

VAASAN YLIOPISTO

TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ

SÄHKÖTEKNIikka

Eemeli Teppo

**MAASULKUSUOJAUKSEN KEHITTÄMINEN KOILLIS-SATAKUNNAN
SÄHKÖ OY:N VERKOSSA**

Diplomityö

Vaasassa 20.8.2019

Työn valvoja

Prof. Lauri Kumpulainen

Työn ohjaajat

Prof. Lauri Kumpulainen ja ins. Matti Takamäki

Työn tarkastaja

Prof. Hannu Laaksonen

ALKULAUSE

Tämä diplomityö tehtiin Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:lle. Haluan kiittää työn ohjaajaa Lauri Kumpulaista saamastani tuesta työn aikana, sekä Hannu Laaksosta diplomityön tarkastamisesta. Haluan myös kiittää Eero Raiskinmäkeä, Matti Takamäkeä, Juha Koi-vulaa ja muuta Koillis-Satakunnan Sähkön henkilökuntaa haastavasta diplomityöai-heesta ja kaikesta saamastani tuesta työn aikana.

Iso kiitos myös perheelleni ja ystävilleni kaikesta tuesta ja kannustamisesta opintojeni aikana.

Vaasassa 20.8.2019

Eemeli Teppo

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| ALKULAUSE | 2 |
| SISÄLLYSLUETTELO | 3 |
| SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO | 6 |
| TIIVISTELMÄ | 8 |
| ABSTRACT | 10 |
| 1 JOHDANTO | 12 |
| 1.1 Tausta | 13 |
| 1.2 Työn tavoitteet | 14 |
| 1.3 Taustatietoa Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:stä | 15 |
| 2 JAKELUVERKON VIAT | 17 |
| 2.1 Yleistä | 19 |
| 2.2 Maasulkuviat | 19 |
| 2.2.1 Maasulku maasta erotetussa verkossa | 21 |
| 2.2.2 Maasulku sammutetussa verkossa | 24 |
| 2.2.3 Kaksoismaasulku | 28 |
| 2.2.4 Maasulku ja johdinkatkos | 30 |
| 3 JAKELUVERKON SUOJAUS | 32 |
| 3.1 Vaatimukset maasulkusuojaukselle | 32 |
| 3.2 Suojareleet | 33 |
| 3.2.1 Mittamuuntajat | 34 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.2 | Katkaisijat | 36 |
| 3.2.3 | Apuenergialähde | 37 |
| 3.3 | Jälleenkytkennät | 37 |
| 3.3.1 | Jälleenkytkennät sekaverkoissa | 38 |
| 3.3.2 | Hajautetun tuotannon vaikutus keskijänniteverkon maasulkusuojaukseen | 38 |
| 3.4 | Suojauksen selektiivisyys | 40 |
| 3.4.1 | Aikaselektiivisyys | 40 |
| 3.4.2 | Virtaselektiivisyys | 41 |
| 4 | MAASULKUSUOJAUS | 43 |
| 4.1 | Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskenta | 43 |
| 4.2 | Maadoitusjännitteet | 44 |
| 4.3 | Maadoitusjännitteiden hallinta | 49 |
| 4.4 | Maasulkuvirran kompensointi | 50 |
| 4.4.1 | Kaapelointisteen kasvun vaikutus maasulkuvirran resistiiviseen komponenttiin | 52 |
| 4.4.2 | Hajautetun kompensoinnin käyttö laajoissa kaapeliverkoissa | 53 |
| 4.5 | Maasulkusuojauksen toteutus | 55 |
| 4.5.1 | Nollajännitteen ja nollavirran suuruus | 55 |
| 4.5.2 | I_{0sin} - ja I_{0cos} -periaate maasulkusuojauksessa | 59 |
| 4.5.3 | Maasulkusuojauksen laajakulma-asettelu | 61 |
| 4.5.4 | Katkeileva maasulku | 62 |
| 4.6 | Suunnatun maasulkusuojauksen asettelu | 65 |
| 4.7 | Maasta erotettu verkko | 66 |
| 4.8 | Kompensoitu verkko | 68 |
| 4.9 | Vian poistumisen aiheuttamat jälkivärähtelyilmiöt sammutetussa verkossa | 70 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5 | KOILLIS-SATAKUNNAN SÄHKÖN KESKIJÄNNITEVERKON MAASULKUSUOJAUS | 74 |
| 5.1 | Kosketusjännitevaatimusten täyttyminen nykyisessä verkossa | 75 |
| 5.1.1 | Heinäahon sähköasema | 76 |
| 5.1.2 | Virtain sähköasema | 77 |
| 5.1.3 | Toopakan sähköasema | 78 |
| 5.1.4 | Inhan sähköasema | 79 |
| 5.1.5 | Ähtärin sähköasema | 80 |
| 5.1.6 | Ritarin sähköasema | 81 |
| 5.1.7 | Killinkosken sähköasema | 82 |
| 5.1.8 | Yhteenvedo kosketusjännitevaatimusten täyttymisestä nykyisessä verkossa | 82 |
| 5.2 | Kosketusjännitevaatimusten täyttyminen tavoiteverkossa | 83 |
| 5.3 | Auguste-pilottiprojekti | 87 |
| 5.4 | Maasulkukokeista saatujen häiriötallenteiden tarkastelu | 89 |
| 5.5 | Suosituksia | 93 |
| 5.5.1 | Maasulkuvirran kompensointikapasiteetin lisäystarpeet | 93 |
| 5.5.2 | Keinoja kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi sekaverkoissa | 94 |
| 5.5.3 | 1 kV jännitetason hyödyntäminen maasulkuvirtatasojen kasvun hillitsemiseksi | 95 |
| 5.5.4 | Kompensointiasteen muutos | 97 |
| 5.5.5 | Kompensointikuristimen lisävastuksen ohjaustapa | 98 |
| 5.5.6 | Sähköasemat ilman katkeilevan maasulun tunnistavia suojareleitä | 99 |
| 5.5.7 | Virtainjektiolaitteiden tarpeellisuus tavoiteverkossa | 100 |
| 5.5.8 | Pikajälleenkytkentöjen jännitteetön aika ja hajautettu tuotanto | 101 |
| 6 | YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSTARPEET | 102 |

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|----------------|------------------------------------|
| $\cos \varphi$ | Tehokerroin |
| E | Ekvivalenttinen jännitelähde (V) |
| I | Virta (A) |
| I_k | Oikosulkuvirta (A) |
| I_{k2} | Kaksivaiheinen oikosulkuvirta (A) |
| I_{k1s} | 1s kestoinen ekvivalenttinen virta |
| J | Imaginääriyksikkö |
| L | Induktanssi (H) |
| P | Teho (W) |
| R | Resistanssi (Ω) |
| R_f | Vikaresistanssi (Ω) |
| S | Näennäisteho (VA) |
| ω | Kulmanopeus (rad/s) |
| U_0 | Nollajännite (V) |
| U_v | Vaihejännite (V) |
| K | Maasulkuvirrrankompensointi aste |

| | |
|-----------|---|
| I_L | Sammutuskuristimen tuottama induktiivinen virta (A) |
| I_C | Verkon tuottama kapasitiivinen virta (A) |
| R_m | Maadoitusresistanssi (Ω) |
| I_r | Maasulkuvirran resistiivinen komponentti (A) |
| φ | Vaihesiirtokulma ($^\circ$) |
| I_0 | Nollavirta (A) |

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö****Tekijä:** Eemeli Teppo**Diplomityön nimi:** Maasulkusuojauksen kehittäminen Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n verkossa**Valvoja:** Professori Lauri Kumpulainen**Ohjaajat:** Professori Lauri Kumpulainen ja insinööri Matti Takamäki**Tarkastaja:** Professori Hannu Laaksonen**Tutkinto:** Diplomi-insinööri**Oppiaine:** Sähkötekniikka**Opintojen aloitusvuosi:** 2012**Diplomityön valmistumisvuosi:** 2019**Sivumäärä:** 107

TIIVISTELMÄ

Sähkömarkkina-alaissa tapahtuneet muutokset ja asiakkaiden vaatimustason kasvu ovat saaneet verkkoyhtiöt parantamaan sähkönjakelun varmuutta. Yhtenä tehokkaimmasta keinosta toimitusvarmuuden parantamiseksi on keskijänniteverkon avojohto-osuuksien korvaaminen maakaapelilla. Myös haja-asutusalueita on viime vuosina alettu kaapeloida voimakkaasti. Koillis-Satakunnan Sähkön verkko sijaitsee alueella, jossa asukastiheys on hyvin matala. Keskijänniteverkko on taajamien keskustoja lukuun ottamatta pitkälti avojohtoverkkoa. Toimitusvarmuuden parantamiseksi tehtävä kaapelointi tulee muuttamaan voimakkaasti verkon rakennetta. Keskijänniteverkon kaapelointiaste on noussut ja tulee tulevaisuudessakin nousemaan toimitusvarmuuden parantamiseksi ja tiukentuneiden toimitusvarmuusvaatimusten täyttämiseksi.

Kaapelointiasteen kasvu tuo mukanaan haasteita verkon suojauksen toteuttamiselle, sillä keskijännitemaakaapeli eroaa sähköisiltä ominaisuuksiltaan merkittävästi aiemmin käytetystä avojohtosta. Merkittävimpiä eroja ovat kaapelin huomattavasti suurempi maasulkuvirran ja loistehon tuotto verrattuna avojohtoon. Pitkillä kaapelilähdöillä maasulkuvirta koostuu kapasitiivisen komponentin lisäksi kaapelin nollaimpedanssin aiheuttamasta resistiivisestä komponentista. Toisin kuin maasulkuvirran kapasitiivista komponenttia, resistiivistä komponenttia ei voida kompensoida käyttämällä kuristimia. Sen suuruutta voidaan kuitenkin rajoittaa käyttämällä hajautettuja kompensointikeloja pitkien lähtöjen yhteydessä. Hajautetun kompensoinnin käytöllä on todettu olevan myös suojauksen toimivuutta parantava vaikutus, sillä nollajännitteen nousu vian aikana on huomattavasti suurempi kuin pelkkää keskitettyä kompensointia käytettäessä.

Lisääntynyt kaapelointi on kasvattanut aiemmin hyvin harvinaisen vikatyypin, katkeilevan maasulun, esiintymistiheyttä. Tämän vikatyypin havaitseminen vanhempaa tekniikkaa edustavilla suojareleillä on hyvin haastavaa. Tällöin on vaarana maasulun varasuojauksen laukeaminen ja suojauksen epäselektiivinen toiminta. Työssä esitellään keinoja, joiden avulla maasulkusuojauksen epäselektiivisen toiminnan mahdollisuus katkeilevan maasulun yhteydessä voidaan minimoida käytettäessä vanhoja suojareleitä.

Tässä diplomityössä on tutkittu Koillis-Satakunnan Sähkön verkostostrategian mukaisen kaapelointiasteen kasvun vaikutuksia sähköverkon käytölle ja suojaukselle. Työssä on käytetty tavoiteverkon mukaista kaapelointiastetta määrittäessä tulevaisuuden maasulkuvirtatasoja. Näiden tulosten perusteella on selvitetty, täyttyvätkö SFS-6001 standardin mukaiset kosketusjännitevaatimukset nykyisellä verkolla ja tavoiteverkolla. Lisäksi työssä on selvitetty vaihtoehtoja maasulkuvirran kompensointikapasiteetin kasvattamiseksi sekä laadittu suositus maasulkuvirran kompensoinnin kehittämiseksi tulevaisuudessa kaapelointiasteen kasvaessa.

AVAINSANAT: Maasulkusuojaus, kompensointi

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and innovations****Author:** Eemeli Teppo**Topic of the Thesis:** Development of earth fault protection in Koillis-Satakunnan Sähkö Oy's distribution network**Supervisor:** Professor Lauri Kumpulainen**Instructor:** Professor Lauri Kumpulainen and Bachelor of Engineering Matti Takamäki**Evaluator:** Professor Hannu Laaksonen**Degree:** Master of Science in Technology**Major of Subject:** Electrical Engineering**Year of Entering the University:** 2012**Year of Completing the Thesis:** 2019**Pages:** 107

ABSTRACT

The changes in the Electricity Market Act and increased customers' security of supply requirements have led distribution network operators to develop the networks towards more uninterruptible supply. One of the most effective ways to improve the resilience of the networks against harsh weather conditions is to replace overhead lines with underground cables. During the last few years many overhead line feeders located in rural areas have been replaced by underground cables. Koillis-Satakunnan Sähkö's network is located in area where population density is low. The medium voltage network has been mainly overhead lines except town centers. Increased underground cabling will change network structure. The share of underground cables has increased in recent years and will do so also in future to fulfill the increased customer demand and requirements of the law.

The increasing share of cables will bring challenges for protection because underground cables have different electrical properties compared with overhead lines. The main difference is that underground cable develops considerably higher amount of earth-fault current and reactive power. With long underground cable feeders, an earth-fault also has a resistive current component due to considered zero sequence series impedance. Unlike the capacitive component of earth fault current the resistive component cannot be compensated by using Petersen coils. The resistive component of earth-fault can be limited by using distributed earth fault compensation devices installed along long underground cable feeders. It has noticed that using distributed compensation devices has positive effect on detecting earth-fault because zero sequence voltage during earth-fault will be higher than using only centralized compensation. Underground cables will bring a new type fault in compensated networks that is intermittent earth-fault. Detecting this kind of fault is difficult by using old style protection relays. This might cause unselective tripping of U_0 based backup protection. In this thesis methods how to avoid unselective tripping during intermittent earth-faults when old fashioned relays are still in use are showed.

In this thesis, the effect of increased amount of cabling for earth-fault protection is analyzed. The calculation of earth-fault current levels in the future is based on amount of underground cabling in the target network that can fulfil the reliability required by law

according to the network strategy. Based on those results, the touch voltages are calculated for today's network and for the target network to find out whether they fulfill the requirements of SFS-6001. Also different possibilities how to increase the earth-fault current compensation capacity are introduced. Based on those calculations recommendations are given on how earth-fault compensation should be developed in the future when the amount of underground cable is increased.

KEYWORDS: Earth fault protection, compensation

1 JOHDANTO

Sähköstä on nykyään tullut niin välttämätön hyödyke yhteiskunnalle, että lyhyetkin keskeytykset aiheuttavat suurta haittaa käyttäjille. Tämän takia verkonhaltijoiden tulee ylläpitää, käyttää ja kehittää sähköverkkoaan siten, että laatuvaatimukset sähkönsiirron ja jakelun osalta täyttyvät. Näiden laatuvaatimusten täyttämiseksi on viime vuosina muutettu runsaasti keskijänniteavojohtoa maakaapeliksi erityisesti haja-asutusalueilla. Kaapeliverkko ei ole alttiina kaatuville puille tai lumikuormalle. Yleisin uhka kaapeliverkolle on kaivinkoneet. Kaapeloimalla pystytään tehokkaasti vähentämään myrskyjen aiheuttamia sähkönjakelun keskeytyksiä.

Keskijännitemaakaapeli eroaa kuitenkin sähköisiltä ominaisuuksiltaan avojohdosta. Suurimpana erona on maakaapelin noin 50-kertainen maakapasitanssi avojohdosta verrattuna. Kaapeloitaessa haja-asutusalueiden keskijänniteverkkoa muodostuu hyvin pitkiä kaapelilähtöjä, joissa tyypillisesti osa on edelleen avojohdosta. Tällöin muodostuu sekaverkko, jossa yhdistyvät avojohdosta osuuksien vikaherkyys ja maakaapeliverkon suuret maasulkuvirrat. Tällöin kosketusjännitevaatimusten täyttäminen saattaa muodostua erittäin haastavaksi maadoitusolosuhteiden ollessa huonoja. Erityisesti avojohdosta osuuksilla, joissa jakelumuntamoiden maadoitukset eivät ole yhdistettyinä toisiinsa, saavat maadoitusresistanssit huomattavasti suurempia arvoja kuin kaapeliverkoissa, joissa jakelumuntamoiden maadoitukset ovat yhdistettyinä toisiinsa maakaapelin keskusköydellä.

Maasulkuvirtojen kasvettua kaapeloinnin vuoksi on monissa tilanteissa kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi jouduttu maasulkuvirtojen kasvua rajoittamaan. Maasulkuvirtojen rajoittamiseksi käytetään yleensä sammutuskuristimia. Sammutetussa verkossa päämuuntajan tähtipisteen ja maan välille kytketään induktanssi, joka kompensoi kapasitiivisen maasulkuvirran. Sammutuksen käyttöönotto aiheuttaa yleensä tarpeen muuttaa maasulkusuojien asetteluja suojauksen oikeaoppisen toiminnan varmistamiseksi. Tässä työssä on tarkoitus tuoda esille keskijänniteverkon suojauksen ja maasulkuvirran sammutuksen kehittämisen kannalta oleellisia asioita, jotka huomioimalla suojauksen toimivuus voidaan varmistaa myös tulevaisuudessa verkon kaapelointiasteen kasvaessa. Lisäksi on

tarkoitus selvittää kuinka SFS-6001 -standardin maadoitusjännitevaatimukset pystytään täyttämään nyt, ja tulevaisuudessa kun verkon kaapelointiaste kasvaa huomattavasti.

1.1 Tausta

Koillis-Satakunnan Sähkön verkko sijaitsee suurimmaksi osaksi harvaanasutulla alueella, ja verkko on toteutettu suurilta osin käyttäen avojohtorakenteita. Verkko on tällöin alttiina myrskyjen ja muiden luonnonilmiöiden aiheuttamille vioille ja häiriöille. Vuonna 2013 sähkömarkkinalakia uudistettiin tavoitteena parantaa sähköverkkojen toimintavarmuutta luonnonilmiöitä vastaan. Suurimpana haasteena verkkoyhtiöille on täyttää lain asettamat vaatimukset sähkön toimitusvarmuudelle. Sähkömarkkinalain 588/2013 51§:n mukaan sähköverkko on suunniteltava ja rakennettava, ja sitä on ylläpidettävä siten että:

Verkko täyttää järjestelmävastaavan kantaverkonhaltijan asettamat verkon käyttövarmuutta ja luotettavuutta koskevat vaatimukset.

Jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei aiheuta asema-kaava-alueella verkon käyttäjälle yli 6 tuntia kestävää sähköjakelun keskeytystä.

Jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei aiheuta muulla kuin 2 kohdassa tarkoitettulla alueella verkon käyttäjälle yli 36 tuntia kestävää sähköjakelun keskeytystä.

Jakeluverkonhaltija voi määrittää käyttöpaikkaan sovellettavan tavoitetason 1 momentin 3 kohdasta poiketen paikallisten olosuhteiden mukaisesti, jos:

- käyttöpaikka sijaitsee saarella, johon ei ole siltaa tai vastaavaa muuta kiinteää yhteyttä taikka säännöllisesti liikennöitävää maantielauttayhteyttä; tai

- käyttöpaikan vuotuinen sähkönkulutus on ollut kolmen edellisen kalenterivuoden aikana enintään 2 500 kilowattituntia ja 1 momentin 3 kohdan vaatimuksen täyttämisen edellyttämien investointien kustannukset olisivat käyttöpaikan osalta poikkeuksellisen suuret sen muista käyttöpaikoista etäisen sijainnin vuoksi.

Jakeluverkon haltijan on täytettävä sähkömarkkinalain asettamat sähkötoimituksen laatuvaatimukset kokonaisuudessaan viimeistään 31.12.2028. Jakeluverkon haltijan hakemuksesta tätä siirtymäaikaa voidaan pidentää painavista syistä enintään 31.12.2032 ja erittäin painavista syistä 31.12.2036 asti.

Koillis-Satakunnan Sähkö on yksi jakeluverkkoyhtiöistä, joille on myönnetty pitkä jatko-aika vuoden 2036 loppuun asti. Siihen mennessä on verkkoa kehitettävä niin, että lainsäädännön asettamat vaatimukset sähkön toimitusvarmuudelle voidaan täyttää. Yhtenä tehokkaimmista keinoista on ilmajohtojen korvaaminen maakaapelilla.

Tämä työ keskittyy keskijänniteverkon kaapeloinnin aiheuttamiin haasteisiin maasulkusuojausjärjestelmien kannalta. Sähkömarkkinalain asettamien vaatimusten täyttämisen on arvioitu vaativan noin 45 km verran avojohto osuuksien muuttamista jokaisella sähköasemalla. Yhteensä tämä tarkoittaa noin 350 km lisää keskijännitemaakaapelia. Tällöin verkon maasulkuvirtatasot tulevat kasvamaan voimakkaasti aiheuttaen tarvetta maasulkuvirran kompensoinnille ja haasteita maasulkusuojausjärjestelmälle.

1.2 Työn tavoitteet

Verkon kaapelointiasteen kasvaessa lisääntyy tarve maasulkuvirran kompensoinnille sekä loistehon kompensoinnille maakaapelin maa- ja käyttökapasitanssien ollessa moninkertaisia ilmajohtoon verrattuna. Kaapelointiasteen kasvu lisää myös katkeilevan maasulkuvirran esiintymistä ja näin myös kyseisen vian havaitsevien suojauslaitteiden tarvetta. Lisäksi vuonna 2015 uudistettu suurjännitesähköasennukset SFS 6001 -standardissa on esitetty uudet vaatimukset verkossa esiintyville suurimmille sallituille kosketusjännitteille. Työssä selvitetään, kuinka kaapelointiasteen kasvu vaikuttaa maasulkusuojausjärjestelmään.

ja maasulkuvirran kompensointitarpeeseen Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n verkossa. Työssä määritetään arviot tavoiteverkon maasulkuvirtatasoista sähköasemittain. Näiden tulosten pohjalta luodaan kehittämissuunnitelma kohti verkostostrategian mukaista tavoiteverkkoa. Pääpaino tulee olemaan maasulkusuojauksessa ja maasulkuvirran kompensoinnissa, sillä näihin asioihin kaapelointiasteen nousu vaikuttaa suuresti. Yhtenä työn tavoitteena on antaa ohjeistus, kuinka maasulkuvirran kompensointia tulisi tulevaisuudessa kehittää, ettei kasvaneet maasulkuvirta tasot aiheuttaisi ongelmia kosketusjännitteiden kanssa. Työssä on tarkoitus vertailla eri vaihtoehtoja, joilla maasulkuvirran kompensointi kykyä voidaan lisätä, siten että kosketusjännitevaatimukset voidaan täyttää myös tulevaisuudessa.

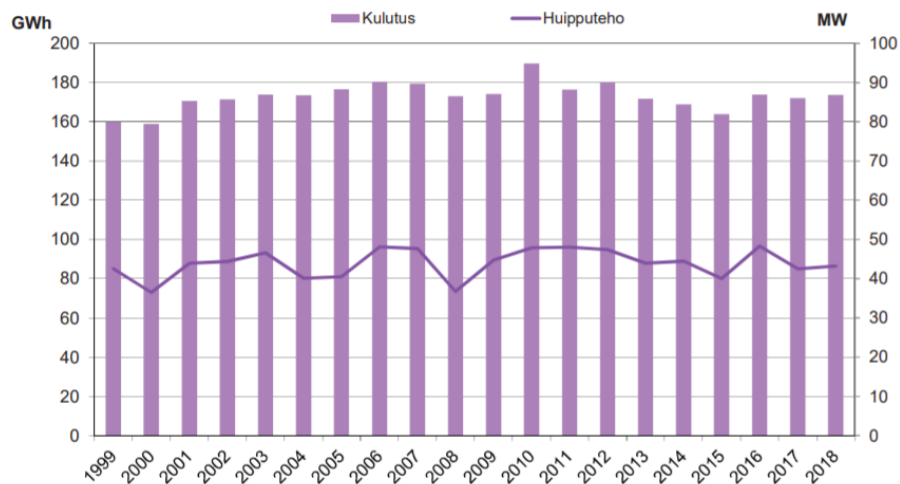
Työn ulkopuolelle rajataan suoraan tai resistanssin kautta maadoitettujen keskijänniteverkkojen maasulkusuojauksen tarkastelu, sillä tällaisia maadoitustapoja ei Koillis-Satakunnan Sähkön verkossa ole käytössä. Myös pienjänniteverkon suojausten tarkastelu rajataan työn ulkopuolelle, sillä pienjänniteverkossa kaapelointiasteen nousu ei aiheuta tarvetta suojaustarkastelulle.

1.3 Taustatietoa Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:stä

Koillis-Satakunnan Sähkö -konsernin muodostavat emoyhtiö Koillis-Satakunnan sähkö Oy sekä tytäryhtiöt Killin Voima Oy (100 %), Perhon Voima Oy (100 %) ja Sähkö-Virkeät Oy (64,5 %). Koillis-Satakunnan Sähkö Oy harjoittaa sähköverkkoliiketoimintaa ja sähkön myyntiliiketoimintaa. Killin Voima Oy tuottaa sähköä kolmella vesivoimalaitoksella, joista kaksi sijaitsee Virroilla ja yksi Parkanossa. Killin Voiman vuosituotanto oli vuonna 2018 19,2 GWh, mikä jää noin 30 % alle keskimääräisen tason kuivuuden vuoksi. Sähkö-Virkeät Oy harjoittaa alueverkkotoimintaa ja omistaa 190 km pituisen 110 kV alueverkon välillä Alajärvi – Ähtäri – Virrat – Keuruu – Petäjävesi.

Koillis-Satakunnan Sähkö toimitti vuonna 2018 sähköä yhtiön verkkoalueen asiakkaille 174 GWh. Yhtiön verkkoalueen suurin yhden tunnin tehohuippu vuonna 2018 oli 43,2

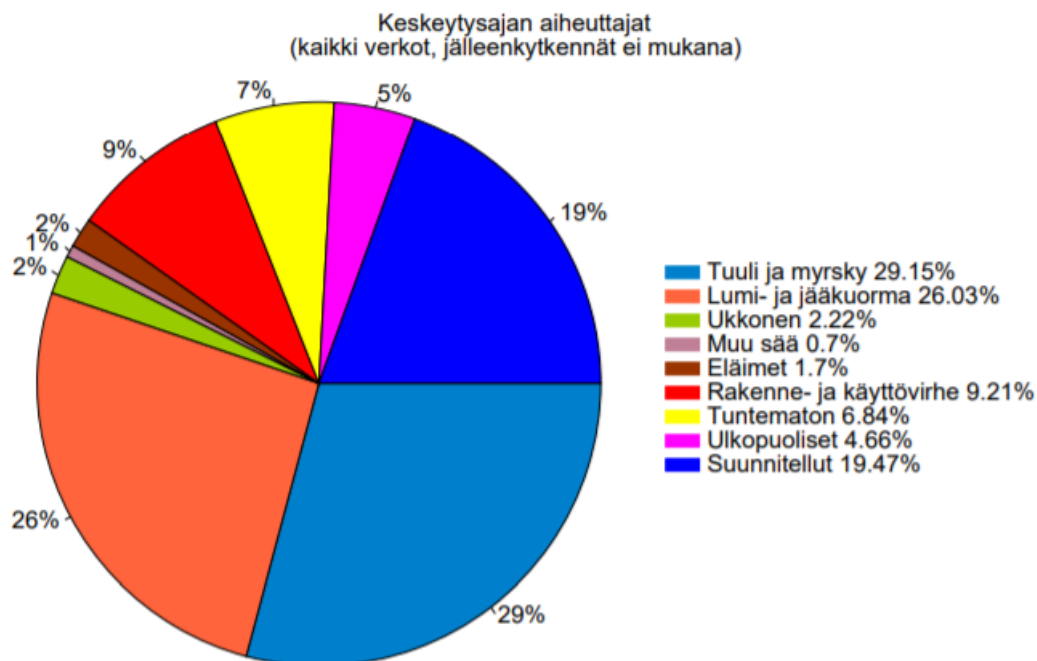
MW ja se mitattiin 28.2.2018 klo 8-9 välisenä aikana. Yhtiön asiakasmäärä käyttöpaik-
koina mitattuna oli vuoden 2018 lopussa 15963, näistä 86,5 % oli yksityishenkilöitä
(Koillis-Satakunnan Sähkö Oy vuosikertomus 2018). Kuvassa 1 on esitetty Koillis-Sata-
kunnan Sähkön verkkoalueen asiakkaille toimittaman sähköenergian määrän ja huippu-
tehon kehitys vuosina 1999 – 2018.



Kuva 1. Kuva 1. Vuosittain verkkoalueen asiakkaille toimitetun sähköenergian ja huipputehon kehitys vuosina 1999 – 2018 (Koillis-Satakunnan Sähkö Oy Vuosikertomus 2018).

2 JAKELUVERKON VIAT

Vaikka sähkömarkkinalain vaatimuksesta jakeluverkon vikaantumisherkkyyttä on pyritty pienentämään toimitusvarmuuden parantamiseksi, tapahtuu verkossa silti vikoja. Viat aiheutuvat yleensä luonnonilmiöistä kuten myrskyistä, ukkosesta, lumikuormasta, työko-neista, eläimistä tai johdolle nojaavista puista. Noin 90 % käyttäjille aiheutuneista keskeytyksistä aiheutuu keskijänniteverkon vioista. Loput aiheutuvat pääosin pienjänniteverkon vioista. Keskijänniteavojohtoverkossa esiintyvistä vioista suurin osa, noin 90 % on lyhytkestoisia ja ohimeneviä, joiden selvittämiseen käytetään pika- ja aikajälleenkyt-kentöjä. (Lakervi & Partanen 2009: 79.) Kuvassa 2 on esitetty keskijänniteverkon keskeytysten aiheuttajat vuonna 2017.



Kuva 2. Keskijänniteverkon keskeytysten aiheuttajat vuonna 2017 (Energiateollisuus 2018).

Kuvasta havaitaan tuulen ja myrskyn aiheuttavan yli puolet keskijänniteverkon keskeytyksistä. Kuva ei sisällä jälleenkytkennöistä aiheutuneita lyhyitä keskeytyksiä. Jälleenkytkennät ovat tehokas keino avojohtoverkon vikojen poistamiseen. Esim. vuonna 2017 Suomessa keskijänniteverkon vioista 66,23 % saatiin poistetuksi jälleenkytkentöjen

avulla. Näistä noin kolmasosa ei poistunut pelkällä pikajälleenkytkennällä vaan vaati lisäksi aikajälleenkytkennän. (Energiateollisuus 2016).

Kaapelointiasteen kasvaessa keskijänniteverkon viat vähenevät merkittävästi, mutta jälleenkytkentöjen osuus selvitetystä vioista pienenee. Kaapeliverkoissa olevat viat ovat aina pysyviä, ja tästä syystä kokonaan kaapeloiduilla lähdöillä ei yleensä käytetä jälleenkytkentöjä.

Energiateollisuuden tilastoista voidaan päätellä, että korkea kaapelointiaste tarkoittaa vähäistä keskeytysmäärää, mutta matala kaapelointiaste ei välttämättä tarkoita suurta keskeytysmäärää. Avojohtoverkollakin voidaan siis saavuttaa luotettava sähkönjakelu, mikäli puiden kaatuminen tai nojaaminen johdolle voidaan luotettavasti estää. Hajonta matalan kaapelointiasteen yhtiöiden välillä on tosin melko suuri. Koillis-Satakunnan Sähkön keskijänniteverkosta 9,1 % ja pienjänniteverkosta 34,5 % oli kaapeloitu vuoden 2017 lopussa. Kuvassa 3 on esitetty koko sähköverkon kaapelointiasteen kehitys vuosina 2013 – 2018.



Kuva 3. Koillis-Satakunnan Sähkön jakeluverkon kaapelointiasteen kehitys vuosina 2013-2018 (Koillis-Satakunnan Sähkö Oy Vuosikertomus 2018).

Kehittämällä suojausta voidaan vian vaikutusaluetta saada pienennettyä, jolloin toimituskeskeytys koskee pienempää määrää asiakkaita. Lisäksi suojausjärjestelyillä voidaan nopeuttaa vian paikallistamista ja näin lyhentää toimituskeskeytystä.

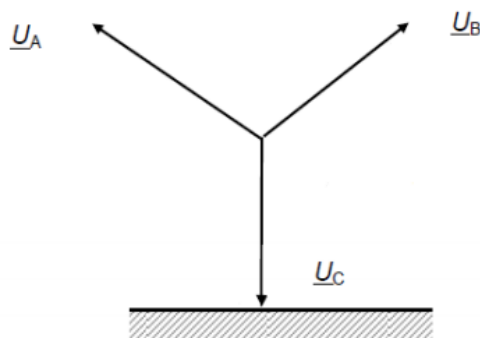
2.1 Yleistä

Jakeluverkon viat voidaan jakaa oikosulku- ja maasulkuvikoihin. Oikosulkuviat ovat vaiheiden välisiä vikoja, joissa ei ole mukana maakosketusta. Maasuluissa vikavirtapiirissä on mukana myös maakosketus. Viat johtavat yleensä tilanteeseen, jossa sähkönjakelua ei voida jatkaa, ennen kuin vika on saatu poistetuksi. Tässä työssä keskitytään maasulkuvikoihin.

2.2 Maasulkuviat

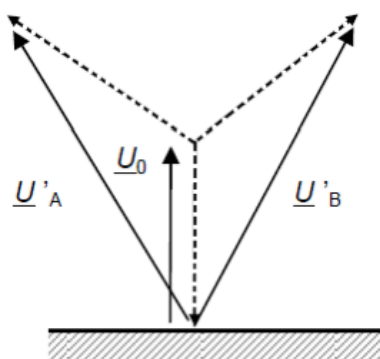
Maasulku on sähköturvallisuusmääräyksissä määritelty käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi. Maasulku eroaa oikosulusta silloin, kun kolmivaihejärjestelmän tähtipistettä ei ole maadoitettu. Käyttömaadoitetuissa verkoissa maasulku on luonteeltaan yksivaiheisen oikosulun kaltainen, ja vikavirran suuruus voidaan laskea verkon impedanssien avulla. Tällaisessa verkossa oikosulkusuojaus toimii myös maasulussa, ellei vikaresistanssi ole liian suuri (ABB 2000: 248). Suomessa keskijänniteverkon tähtipisteitä ei ole maadoitettu, jolloin maasulkuvirrat ovat hyvin pieniä verrattuna oikosulkuvirtoihin, mahdollisesti jopa kuormitusvirtoja pienempiä. Syy sille, miksi keskijänniteverkon tähtipistettä ei ole maadoitettu, johtuu huonosti johtavasta maaperästä ja tästä aiheutuvasta kosketusjänniteongelmasta. Kosketusjännitteiden vuoksi ei verkkoa yleensä voida käyttää maasulun aikana, vaikka muuten verkon käyttö maasulun aikana olisi mahdollista pienen vikavirran vuoksi. Pienjänniteverkon jännitteet ovat keskijänniteverkon maasulun aikana normaalit, sillä jakelumuntajien ensiökäämit ovat kytketty kolmioon (Lakervi & Partanen 2009: 189).

Normaalisti toimiessaan sähköverkko on lähes symmetrinen. Tällä tarkoitetaan sitä, että kuormaimpedanssit ja verkon impedanssit ovat jokaisella vaiheella samat. Lisäksi jokaisen vaiheen vaihejännitteet ovat 120° vaihesiirrosta toisiinsa nähden. Symmetrisyydestä johtuen verkko voidaan kuvata yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jolloin laskenta on helpompi suorittaa. Kun yhden vaiheen virta tai jännite on laskettu, voidaan olettaa, että muiden vaiheiden vastaavat suureet ovat yhtä suuria ja 120° vaihesiirrosta toisiinsa nähden. Vikatapauksista symmetrisiä ovat mm. muuntajan tai johdon kolmivaiheinen oikosulku. Kuvassa 4 on esitetty symmetrisen kolmivaihejärjestelmän jännitteet. Kuvassa \underline{U}_A , \underline{U}_B ja \underline{U}_C kuvaavat vaiheiden A, B ja C jänniteosoittimia.



Kuva 4. Jännite osoittimet normaalitilassa (Pekkala 2009: 5).

Kuvassa 5 on esitetty vaihejännitteet yksivaiheisessa vikaresistanssittomassa maasulussa. Kuvassa 5 esitetyt \underline{U}'_A , \underline{U}'_B ovat terveiden vaiheiden vaihejännitteet ja \underline{U}_0 on nollajännite. Maasulussa olevan vaiheen \underline{U}_C jännite on nolla maapotentiaaliin nähden. (Pekkala 2009: 13.)



Kuva 5. Jänniteosoittimet epäsymmetrisen vikaresistanssittoman maasulku vian aikana. (Pekkala 2009: 13)

Epäsymmetristen vikojen vaikutukset näkyvät eri lailla eri vaiheissa. Tällaisia vikoja ovat mm. 1- ja 2-vaiheiset maasulut sekä 2-vaiheiset oikosulut (Elovaara & Haarla 2010: 167).

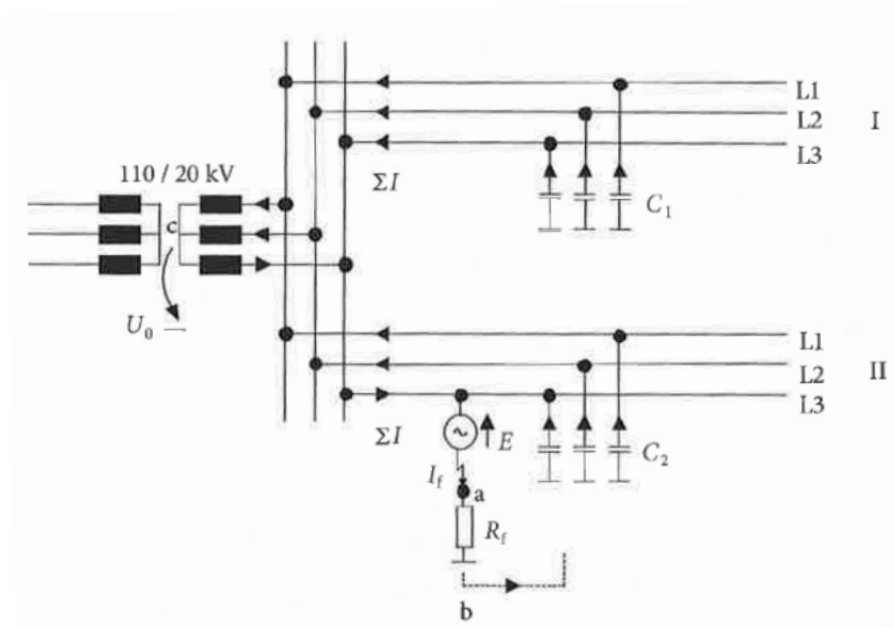
Käyttömaadoitetuissa verkoissa maasulku on luonteeltaan kuin oikosulku ja vikavirran suuruus voidaan laskea, kun tunnetaan verkon impedanssit. Tällöin maasulkusuojauksessa voidaan käyttää oikosulkusuojausta (ABB 2000: 248). Suomessa 400 V:n pienjänniteverkko on käyttömaadoitettu, kun taas 1 kV:n ja 20 kV:n verkot ovat maasta erotettuja.

2.2.1 Maasulku maasta erotetussa verkossa

Maasta erotetussa verkossa muuntajan tähtipistettä ei ole maadoitettu. Mikäli verkossa esiintyvät maasulkuvirtatasot ovat riittävän alhaisia kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi, on maasta erotetun verkon käyttäminen edullinen ja yksinkertainen ratkaisu. Tällöin verkon tulee koostua lähes täysin avojohdoista, sillä maakaapelin käyttö kasvattaa maasulkuvirtatasoja niin paljon, ettei maasta erotetun verkon käyttö ole mahdollista.

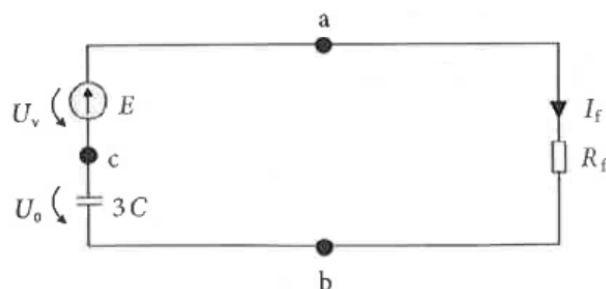
Maasta erotetun verkon maasulkutilanteessa verkon kaikkien vaiheiden ja verkon tähtipisteen jännitteet muuttuvat. Lisäksi verkon eri osissa esiintyy johtojen maakapasitanssien kautta kulkevia kapasitiivisia vikavirtoja. Maasulkuvirralla on kulkureitti vikapaikasta vikaresistanssin välityksellä maahan, johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien impedanssien kautta päämuuntajan käämityksiin ja sieltä maasulussa olevan vaiheen

kautta vikapaikkaan. Kuvassa 6 on esitetty maasta erotetussa verkossa tapahtuva 1-vaiheinen maasulku.



Kuva 6. Maasta erotetun kolmivaihejärjestelmän yksivaiheinen maasulku (Lakervi & Partanen: 183).

Johtimien ja muuntajakäämien impedanssit ovat vaihejohtimien maakapasitansseihin nähden niin pieniä, että ne voidaan jättää merkityksettöminä huomioimatta maasulkulaskelemissa. Maasulkupiiristä voidaan muodostaa kuvan 7 mukainen sijaiskytkentä.

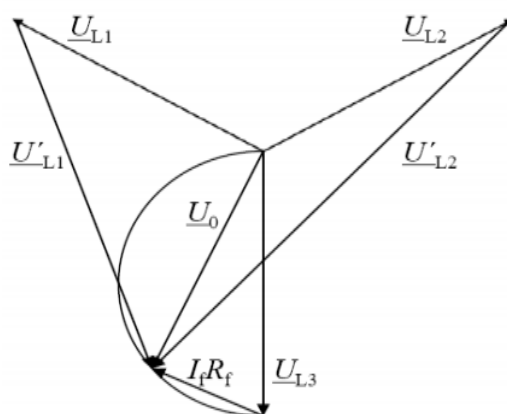


Kuva 7. Maasulkupiirin sijaiskytkentä (Lakervi & Partanen: 184).

Kuvassa 7 on vikapaikkaan sijoitettu Theveninin lähde, jonka lähdejännite on vioittuneessa vaiheessa ennen vikaa vallinneen vaihejännitteen suuruinen. Virtapiiri muodostuu

lisäksi verkon maakapasitansseista $3C$ ja vikaresistanssista R_f . Maasulkuvirran laskentaa käsitellään lisää kappaleessa 4.1.

Maasulun aikana jännitteiden osoittimet käyttäytyvät kuvan 8 osoittamalla tavalla. Nollajännitteen osoitin \underline{U}_0 piirtää vikaresistanssin funktiona puoliympyrän, jonka halkaisija on viallisen vaiheen jännitteen osoitin. Vika resistanssin ollessa 0Ω on nollajännite vaihejännitteen suuruinen. Tällöin maasulussa olevan vaiheen jännite putoaa nolnaan ja terveiden vaiheiden vaihejännitteet nousevat pääjännitteen suuruiseksi. Suurimmillaan terveiden vaiheiden jännite maata vastaan voi maasulussa saavuttaa noin 1,05-kertaisen arvon terveentilan pääjännitteeseen nähden, kun vikaresistanssin suuruus on noin 37 % maakapasitanssien summaa vastaavasta impedanssista. (Mörsky 1992: 301.)



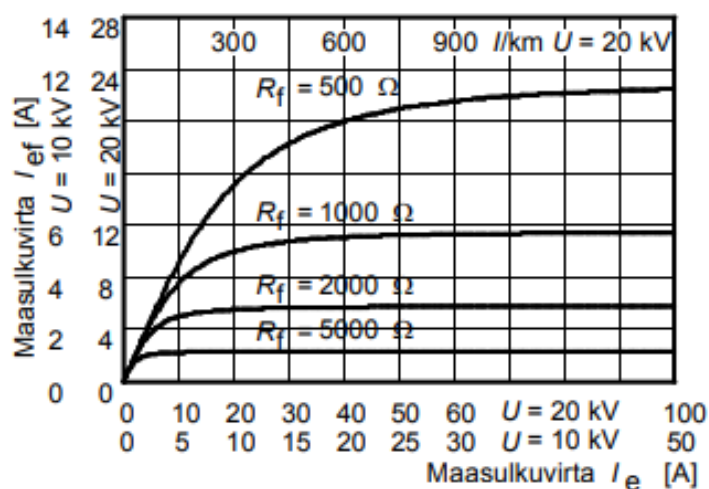
Kuva 8. Jännitteiden osoittimet yksivaiheisessa maasulussa maasta erotetussa verkossa. (Isomäki 2010: 17.)

Nollajännite saadaan laskettua yhtälöllä

$$U_0 = \frac{U_v}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}}, \quad (1)$$

missä R_f on vikaresistanssi ja U_v verkon vaihejännite. Vikavastuksella R_f on nollajännitettä pienentävä vaikutus.

Kuvassa 9 on esitetty vikaresistanssin maasulkuvirtaa pienentävä vaikutus.



Kuva 9. Vikaresistanssin vaikutus maasulkuvirran suuruuteen (ABB 2000: 251).

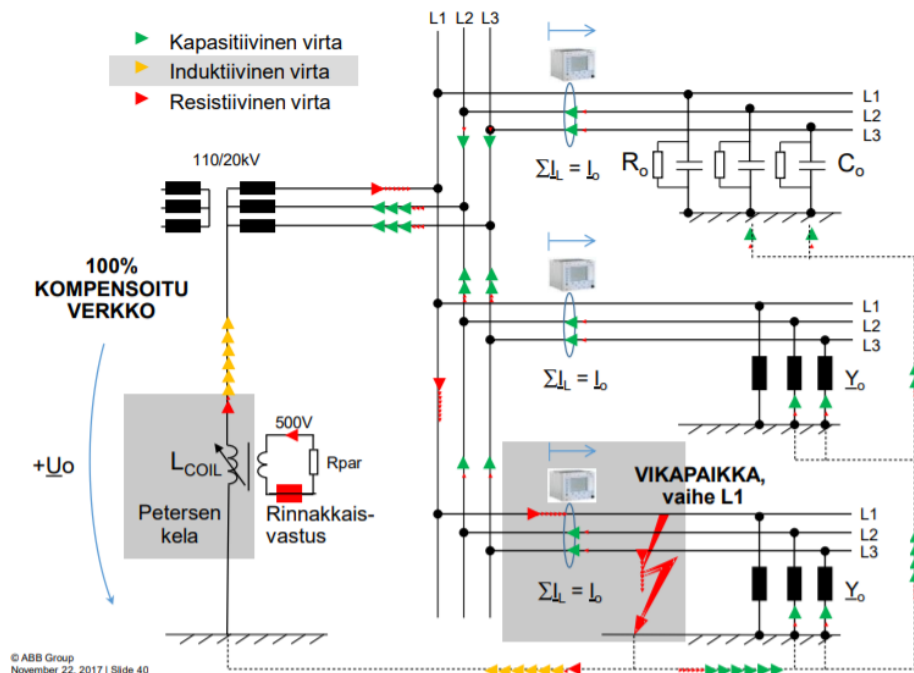
Kuvassa I_e on verkon kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa ja I_{ef} vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta. Kuvasta havaitaan, että vikaresistanssi pienentää voimakkaasti maasulkuvirtaa.

Suojauksen kannalta maasta erotetun verkon käyttäminen voi olla haasteellista, mikäli verkon maakapasitanssi on liian pieni, kuten suppeissa avojohtoverkoissa. Tällöin maasulkuvirran erottaminen normaalista verkon epäsymmetriasta saattaa muodostua haastavaksi. Toimivan suojauksen rakentamiseksi joudutaan maasulkuvirtatasoja kasvattamaan maadoittamalla muuntajan tähtipiste resistanssin kautta. Koillis-Satakunnan Sähköllä ei ole keskijänniteverkkoa, jonka maakapasitanssi olisi niin pieni, että tarvetta maasulkuvirran kasvattamiseksi suojauksen toimivuuden vuoksi olisi. Siksi resistanssin kautta maadoitetun verkon syvällisempi käsittely rajataan tämän työn ulkopuolelle.

2.2.2 Maasulku sammutetussa verkossa

Laajoissa avojohtoverkoissa ja kaapelia sisältävissä verkoissa on suuri maakapasitanssi, ja siten myös maasulkuvirrat suuria. Tämä aiheuttaa tarpeen pienentää maasulkuvirtoja kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi.

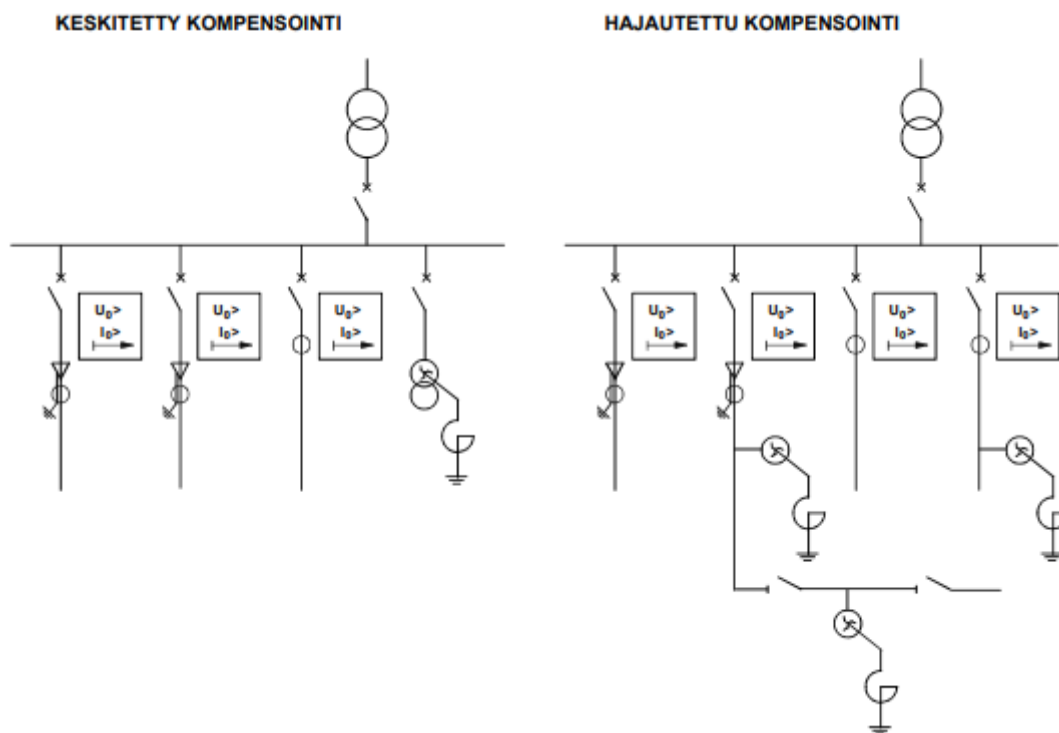
Sammutetussa verkossa maasulkuvirran kapasitiivinen virta kompensoidaan vastakkaisessa kulmassa olevalla induktiivisella virralla. Induktiivinen virta saadaan luotua verkon tähtipisteen kytketyllä säädettävällä induktanssilla eli kuristimella. Tällaisesta maasulkuvirran sammutuslaitteesta käytetään myös nimitystä Petersenin kela tai sammutuskuristin. Kuvassa 10 on esitetty maasulkuvirran kompensoinnin periaate.



Kuva 10. Maasulku sammutetussa verkossa (Wahlroos 2017).

Sammutetussa verkossa maasulkuvirta I_f jää pieneksi, koska induktiivinen ja kapasitiivinen virta kumoavat toisensa. Tällöin vikapaikkaan kulkee ainoastaan resistiivinen jäännösvirta, mikäli verkko on täysin kompensoitu. Kuvassa isolla punaisella nuolella on kuvattu kuristimen lisävastuksen tuottamaa- ja pienillä punaisilla nuolilla kuristimen ja verkon häviöistä aiheutuvaa resistiivistä virtaa. Maasulkuvirtojen jäädessä pieniksi paranevat mahdollisuudet valokaarimaasulun itsestään sammumiseen. Valokaarimaasulun sammussa itsestään vältytään myös sähkönkäyttäjille haitallisten pikajälleenkytkentöjen tekemiseltä.

Verkon kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti sijoittamalla yksi iso säädettävä sammutuskuristin sähköasemalle tai useita pieniä kiinteitä sammutuskuristimia johtolähdöille. Keskitettyä ja hajautettua kompensointia voidaan käyttää myös yhdessä. Tällöin hajautettua kompensointia lisäämällä voidaan pitää maasulkuvirrat kurissa keskitetyn sammutuskuristimen kompensointikyvyn tullessa täyteen. Hajautetut sammutuskuristimet kompensoivat oman johtolähdön maasulkuvirran tai osan siitä. Kytettäessä jokin johtolähtö irti verkosta kytkeytyy myös kompensointikuristin irti verkosta. Tällöin ei ole vaaraa, että verkko tulisi ylikompensoiduksi. Kuvassa 11 on esitetty keskitetty ja hajautettu maasulkuvirran sammutustapa.



Kuva 11. Maasulkuvirran sammutustavat. (ABB 2000: 254.)

Lisäksi voidaan käyttää edellä kuvattujen tapojen yhdistelmää, jossa on sekä keskitettyä että hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Kompensoinnin määrää kuvataan kompensointiasteella K , joka saadaan laskettua yhtälöllä

$$K = \frac{I_L}{I_C},$$

missä I_L on kuristimen virta suorassa maasulussa ja I_C on verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa. Kompensointiasteen ollessa yksi on verkko täysin kompensoitu. Verkon ollessa alikompensoitu on K arvo alle yksi ja verkon ollessa ylikompensoitu on K arvo yli yksi. Tyypillisesti käytettäessä hajautettua kompensointia vain osa lähdön maasulkuvirrasta kompensoidaan. Näin varmistetaan, ettei yksittäinen johtolähtö tulisi ylikompensoiduksi ja aiheuttaisi maasulkusuojauksen toimimattomuutta.

Keskitetyn maasulkuvirran kompensoinnin käyttö ja säätäminen on hajautettuun verrattuna yksinkertaisempaa. Toisaalta sähköasemien kelat joudutaan mitoittamaan riittäviksi myös varasyöttötilanteet huomioiden. Tällöin sähköasemien tulee kyetä kompensoimaan myös korvauskytkentätilanteessa kasvaneen verkon maasulkuvirta.

Kun verkko on täysin kompensoitu, ei maasulun aikana verkossa kulje kapasitiivista maasulkuvirtaa. Maasulun aikana verkossa esiintyy kuitenkin jäännösvirtaa, joka muodostuu verkon häviöistä sekä kuristimen omista pätötehohäviöistä. Tämä jäännösvirta saattaa jäädä niin pieneksi, etteivät suojareleet pysty luotettavasti havaitsemaan vikaantunutta lähtöä. Tämän takia jäännösvirtaa pyritään kasvattamaan kuristimen rinnalle liitetyn lisäresistanssin avulla. Tällöin vioittuneen lähdön alussa oleva summavirtamuuntaja havaitsee resistiivisen virran I_r , jonka suuruus riippuu nollajännitteestä, lisäresistanssista, kuristimen resistanssista sekä verkon resistiivisistä vuotovirrasta (Lakervi & Partanen 2009:184-185). Lisävastuksen aiheuttama jäännösvirran kasvu tulee ottaa huomioon laskettaessa maasulun aikaisten maadoitusjännitteiden suuruuksia.

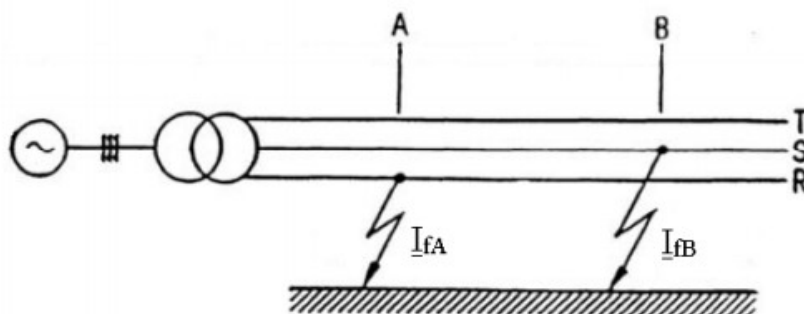
Verkossa esiintyvä vaiheiden välinen kapasitanssi epäsymmetria saa verkossa aikaan terveen tilan nollajännitteen, joka voi olla useita prosentteja vaihejännitteestä. Suojareleiden toiminnan kannalta saattaa liian suuri terveen tilan nollajännite aiheuttaa ongelmia. Terveen tilan nollajännitteen pienentämiseksi voidaan vuorottelun lisäksi käyttää kompensointikuristimen lisävastusta. Tällöin vastuksen tulee olla kytkettynä jatkuvasti. Kompensointiasteella on myös suuri merkitys terveen tilan nollajännitteeseen. Verkon ollessa täysin kompensoitu eli K saadessa arvon 1 on verkko resonanssissa. Tällöin sammutuskuristimen induktiivinen reaktanssi on yhtä suuri verkon kapasitiivisen reaktanssin kanssa.

Kompensointikelaan kuuluu olennaisena osana säätäjä, jonka tehtävänä on pitää verkon kompensointiaste halutun suuruisena verkon kytkentätilan muuttuessa. Säätäjä mittaa verkon nollajännitettä ja säätää kelan induktanssia sen mukaan. Kun verkko on täysin resonanssissa, nollajännite saavuttaa terveen tilan huippuarvon. Verkkoa ei kuitenkaan haluta käyttää täysin kompensoituna, vaan kompensointikuristin viritetään hieman sivuun resonanssista, koska resonanssissa nollajännite saattaisi nousta liian suureksi, ja mahdolliset värähtelyt saattaisivat haitata suojauksen toimintaa. Kuristin viritetään tuottamaan hieman vähemmän induktiivista virtaa kuin verkko tuottaisi kapasitiivista virtaa. Suomessa yleisesti käytetty arvo kompensointiasteelle on 95 %, jota myös Koillis-Satakunnan Sähköllä on käytetty.

Kaapelin lisääntyminen keskijänniteverkossa pienentää terveen tilan nollajännitettä. Tällöin myös säätäjän virityksessä käytettävä resonanssipisteen nollajännite pienenee. Säätäjän luotettavan toiminnan varmistamiseksi on kehitetty virransyöttölaitteita kompensointikelan säätäjille, joiden antamien virta pulssien avulla kompensointikelan viritys suoritetaan.

2.2.3 Kaksoismaasulku

Kaksoismaasulussa kaksi vaihejohtinta joutuu joko suoraan tai vikaresistanssin kautta galvaaniseen yhteyteen maan kanssa eri kohdissa verkkoa. Kuvassa 12 on havainnollistettu kaksivaiheinen maasulku.



Kuva 12. Kaksoismaasulku, jossa kaksi vaihetta on maasulussa eri paikassa verkkoa (Pekkala 2010: 26).

Kaksoismaasulku aiheutuu yleensä, kun yksivaiheisen maasulun vuoksi terveiden vaiheiden jännite maata vasten nousee. Yksivaiheisen maasulun alkutransientin aikana saattaa vaihejännitteen suurin hetkellisarvo olla moninkertainen verrattuna jännitteen suurimpaan arvoon ennen maasulkua (Mörsky 1993: 306).

Kun vikaresistanssit eroavat toisistaan voidaan nollajännite laskea yhtälöllä

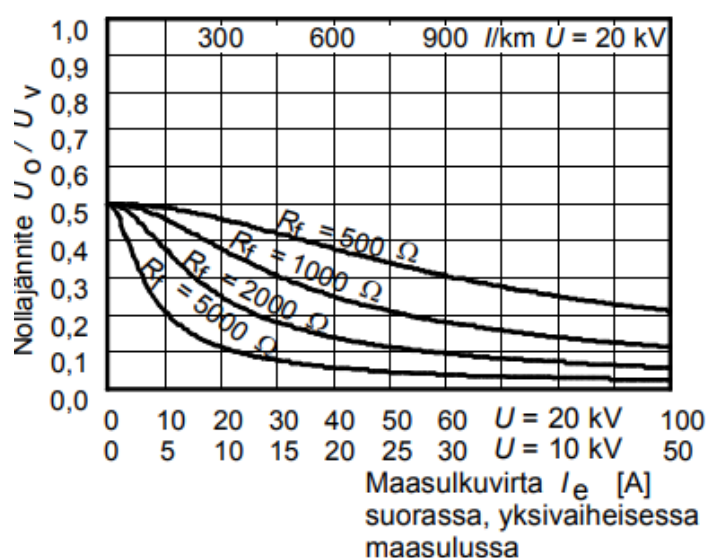
$$\underline{U}_0 = \frac{-R_{fB}\underline{U}_{fA} - R_{fA}\underline{U}_{fB}}{R_{fA} + R_{fB} + j3\omega C_0 R_{fA} R_{fB}}, \quad (2)$$

missä R_{fA} on vikaresistanssi paikassa A ja R_{fB} vikaresistanssi paikassa B.

Kaksoismaasulussa nollajännite on pienimmillään, kun molemmat vikaresistanssit ovat yhtä suuret. Nollajännite voidaan tällöin laskea yhtälöllä

$$U_0 = \frac{U_v}{\sqrt{(R_f 3\omega C_0)^2 + 4}} \quad (\text{ABB 2000: 253}). \quad (3)$$

Kuvassa 13 on esitetty nollajännite kaksoismaasulussa eri vikaresistanssin arvoilla maasulkuvirran funktiona.

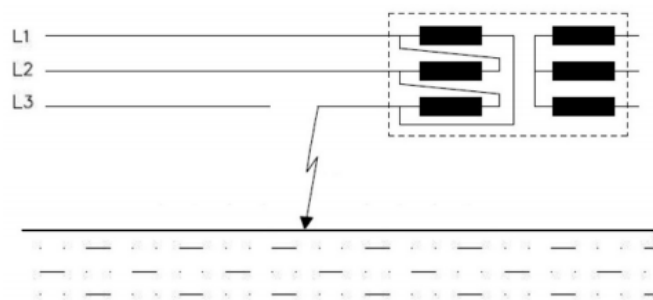


Kuva 13. Nollajännite kaksoismaasulussa vikaresistanssin ollessa yhtä suuri kummasakin vikapaikassa (ABB 2000: 253).

Kuvasta havaitaan, että vikaresistanssin ollessa yhtä suuri molemmissa vikapaikoissa, nousee nollajännite enintään puoleen vaihejännitteestä.

2.2.4 Maasulku ja johdinkatkos

Vaihejohtimen katkeaminen keskijänniteverkossa on jo itsessään vikatapaus, joka tulee havaita ja poistaa. Vikaan liittyy usein yksivaiheinen maasulku. Mikäli johdin katkeaa syötön puolelta, on kyseessä tavallinen yksivaiheinen maasulku. Jos taas johdin katkeaa niin, että ainoastaan kuormituksen puoleinen pää putoaa maahan ja syötön puoleinen pää jää maasta erotetuksi, pienenee maasulkuvirta ja nollajännite kuormituksen impedanssin vuoksi merkittävästi. Kyseinen vikatilanne on havainnollistettu kuvassa 14.



Kuva 14. Johdinkatkoksen aiheuttama maasulku, jossa kuorman puoleinen pää on joutunut kosketuksiin maan kanssa (Pihlaja 2016: 38).

Tällaista vikatyyppeä ei kaapeliverkossa esiinny johtuen siitä, että kaapeli on asennettu maahan. Maasulkuvirran ja nollajännitteen yhtälöt tulevat samanlaisiksi kuin kaksois-maasulussa yhtä suurien vikaresistanssien kautta. Nollajännite kuormituksen puoleisen pään maasulussa saadaan laskettua yhtälöllä

$$U_0 = \frac{U_v}{2 + j3\omega C_0(3Z + 2R_f)} \quad (4)$$

missä Z on kuormitusta vastaava impedanssi. Mikäli katkoksen takana oleva muuntaja on kuormittamaton, on Z muuntajan tyhjäkäynti-impedanssi.

Kaapeliverkoissa vaiheiden väliset maakapasitanssit ovat melko tarkasti yhtä suuret, kun taas avojohtoverkossa vaiheiden välisissä maakapasitansseissa on merkittäviä eroja. Tällöin avojohtoverkon terveen tilan nollajännite on suurempi kuin vastaavan kaapeliverkon. Avojohtoverkoissa nollajännitereleen havahtuminen on aseteltava korkeammaksi kuin kaapeliverkossa, ettei turhia laukaisuja synny. Taulukossa 1 on listattuna johtopituuden maksimiarvoja, jolla suhteellinen nollajännite U_0/U_V on 2 % tai 5 % johtimen katkeamisen kuormituksen puolella aiheuttamassa maasulussa. 100 kVA:n jakelumuuntajaa kuormitetaan nimellisteholla tai se on tyhjäkäynnissä.

Taulukko 1. Johtoverkon maksimipituus suhteellisilla nollajännitteillä 2 % ja 5 % johdinkatkeamassa, maasulun ollessa kuormituksen puolella (Mörsky 1992: 313).

| R_f | $P = 100 \text{ kW}$ | | $P = 0 \text{ kW}$ | |
|---------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| | Kaapeliverkko ($U_0/U_V = 2 \%$) | Avojohtoverkko ($U_0/U_V = 5 \%$) | Kaapeliverkko ($U_0/U_V = 2 \%$) | Avojohtoverkko ($U_0/U_V = 5 \%$) |
| 0 Ω | 12 km | 280 km | 0,17 km | 4 km |
| 500 Ω | 11 km | 260 km | | |
| 1000 Ω | 10 km | 240 km | | |
| 3000 Ω | 8 km | 200 km | | |

Taulukosta havaitaan, että kuorman puoleisen maasulun havaitseminen on haastavaa, erityisesti jos vikapaikan jälkeen ei ole kuormitusta tai verkon pituus on suuri.

3 JAKELUVERKON SUOJAUS

Suunniteltaessa jakeluverkon suojausta tärkeimpiä asioita ovat turvallisuus, luotettavuus ja taloudellisuus. Suojausten tulee estää vian leviäminen, käyttäjien turvallisuuden vaarantuminen, komponenttien vaurioituminen sekä rajata vika-alue mahdollisimman pieneksi.

Suomessa voimassa olevat sähköturvallisuusstandardit sisältävät joukon yleisiä suojaukselle asetettuja vaatimuksia. Suojauksen kehittämisellä minimivaatimuksia tehokkaammaksi voidaan parantaa sähkönjakelun luotettavuutta. (Lakervi & Partanen 2009: 176) Näin voidaan osaltaan päästä lähemmäs uuden sähkömarkkinalain asettamia vaatimuksia sähkönjakelun toimitusvarmuudelle.

Keskijänniteverkon erikoispiirteitä ovat säteittäinen syöttötapa sekä tähtipisteen puuttuminen. Keskijänniteverkko on tyypillisesti rakennettu renkaaksi, mutta sitä käytetään säteittäisesti suojausjärjestelyjen helpottamiseksi. Keskijänniteverkkoa syöttävien sähköasemien kaikki kennot ovat releistettyjä. Lisäksi joillakin lähdoilla on käytössä maastokatkaisijoita, jolloin näille muodostuu peräkkäisiä suojausalueita.

3.1 Vaatimukset maasulkusuojaukselle

Toimivalta suojaukselta vaaditaan kyky erottaa vikaantunut osa muusta verkosta ja estää näin sähkönkäyttäjien turvallisuuden vaarantuminen, sekä estää verkostokomponenttien vaurioituminen vikavirran seurauksena. Tärkeimpiä suojaukselta vaadittavia ominaisuuksia ovat (Blackburn & Domin 2007: 18)

- *Luotettavuus*: varmuus siitä, että suojaus toimii, kuten on tarkoitus.
- *Selektiivisyys*: vian aiheuttama keskeytys rajautuu koskemaan mahdollisimman pientä aluetta.
- *Yksinkertaisuus*: mahdollisimman vähän komponentteja.
- *Taloudellisuus*: riittävän hyvä suojaus minimaalisin kustannuksin.

Suojauksen luotettavuus voidaan jakaa kahteen osaan, toimintavarmuuteen ja turvallisuuteen. Toimintavarmuudella tarkoitetaan sitä, että suojaus toimii oikein, kun järjestelmässä on vika. Turvallisuudella tarkoitetaan sitä, ettei suojaus toimi aiheettomasti, kun järjestelmässä ei ole vikaa. Suojauksen tulee selvitä verkossa esiintyvistä ohimenevistä kytkentäilmiöistä ilman aiheetonta laukaisua ja toisaalta toimia myös vaikeasti havaittavissa vikatapauksissa. Yleensä pyrittäessä kasvattamaan suojauksen toimintavarmuutta heikenee samalla suojauksen turvallisuus, sillä tavalliset kytkentätransientit saattavat aiheuttaa suojauksen toiminnan. Suojauksen toimintanopeudesta ja erityisesti katkaisijoiden toimintanopeudesta on hyötyä rakennettaessa aikaselektiivistä suojausta. Tällöin suojausvyöhykkeiden väliset toiminta-ajat voidaan pitää riittävän lyhyinä, ja näin saadaan myös ensimmäisen suojausvyöhykkeen toiminta-ajat pidettyä kohtuullisina (Blackburn & Domin 2007: 19-21).

Suojauksen pitäminen mahdollisimman yksinkertaisena halutun suojaustason saavuttamiseksi parantaa suojauksen toimintavarmuutta, sillä jokainen komponentti, joka ei ole välttämätön suojauksen toiminnan kannalta, voi aiheuttaa vikaantuessaan ongelmia suojauksen toiminnan kannalta. Lisäksi ylimääräiset komponentit vievät tilaa, aiheuttavat lisää huollon tarvetta ja hankaloittavat suojausjärjestelmän parissa työskentelevien työntekoa.

Suomessa standardi SFS-6001 määrittelee suurimmat sallitut kosketusjännitteet vikavirran kestoajan funktiona. Lisäksi standardissa suositellaan, että suojaus poistaa maasulkuviat automaattisesti.

3.2 Suojareleet

Suojareleet ovat mittalaitteita, jotka tarkkailevat sähköjärjestelmän tilaa ja tarvittaessa suorittavat kytkentöjä tai hälytyksiä automaattisesti ja nopeasti. Suojareleelle tuodaan mittaustiedot mittamuuntajilta, jolloin erisuuruisille verkon primäärisuureille voidaan käyttää samoja releitä. Suojareleet vaativat toimiakseen oikein riittävää tarkkuutta jän-

nite- ja virtamuuntajilta. Lisäksi releet voidaan sijoittaa etäämmäksi mitattavista koh-teista. Releillä pystytään havaitsemaan verkon epänormaalit tilat kuten maasulku- ja oi-
kosulkuviat tai ylikuormitus.

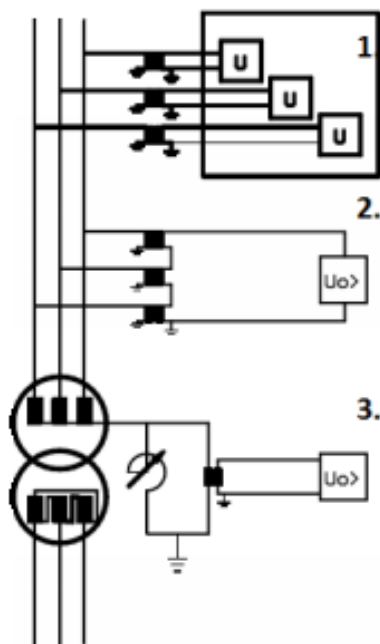
Hyvä toteutettu relesuojausjärjestelmä on selektiivinen, nopea, luotettava, herkkä, ja se toimii myös poikkeuksellisissa käyttötilanteissa. Verkon tila vaihtelee, vikavirrat vaihte-
levat ja mittauksissa voi olla virheitä. Kun releen tarkkailema suure sivuuttaa releeseen
asetellun arvon, rele havahtuu, toimii asetellun ajan kuluttua ja lopuksi antaa laukaisu-
käskyn katkaisijalle. (Mörsky 1992:19) Uudemmissa releissä on lisäksi häiriötallennus-
ominaisuus, jonka avulla vianaikaisia jännitteiden ja virtojen mittaustietoja voidaan tar-
kastella jälkikäteen. Näiden tallenteiden avulla voidaan muun muassa selvittää syitä suo-
jauksen virheelliselle toiminnalle sekä tarkastella verkon käyttäytymistä vian aikana ja
sen jälkeen. Tallenteita voidaan myös käyttää jäännösmaasulkuvirran suuruuden arvioi-
miseen.

3.2.1 Mittamuuntajat

Releet tarvitsevat toimiakseen tiedon verkon jännitteistä ja virroista. Sähköverkoissa
esiintyvät virrat ja jännitteet ovat niin suuria, ettei niitä sellaisenaan voida viedä herkästä
elektroniikasta koostuville releille. Verkossa esiintyvät suureet täytyy muuttaa releille so-
pivaan muotoon. Tähän käytetään mittamuuntajia, jotka, jotka ovat tarkoitettu muutta-
maan mitattu suure sopivaksi mittalaitteiden mitoitusarvoille, sekä erottamaan mittaus-
piiri galvaanisesti suurjännitteisestä päävirtapiiristä. Mittamuuntajia on kahta tyyppiä,
virta- ja jännitemuuntajia, jotka mittaavat nimensä mukaista suuretta. Mittamuuntajilla
on aina nimellisarvot, jotka ilmoitetaan muuntajan ensiö- ja toisioarvoina. Nollajännitteen
mittauksessa jännitemuuntajan nimellisarvona 20 kV:n verkossa käytetään $20000/\sqrt{3}$ V
ensiöpuolella ja 100 V toisiopuolella. Lisäksi mittamuuntajille ilmoitetaan tarkkuusluo-
kat, jotka määräytyvät suurimpien sallittujen virta-, jännite- ja kulmavirheiden mukaan.

Mittamuuntajien nimellisarvot syötetään releille, jotta rele pystyy lakemaan mittamuun-
tajien toisioarvojen avulla laskemaan halutut ensiöarvot. Johtolähtöjä suojaavien releiden
kannalta tärkeimmät suureet ovat vaihevirrat ja jännitteet, nollajännite U_0 ja nollavirta I_0 .

Nollajännite mitataan käyttäen jännitemuuntajien avokolmiokäämitystä, verkon tähtipisteen ja maapotentiaalin väliin kytketyn mittamuuntajan toisiosta tai laskennallisen summamittauksen avulla. Kuvassa 15 on havainnollistettu nollajännitteiden mittaustapoja.

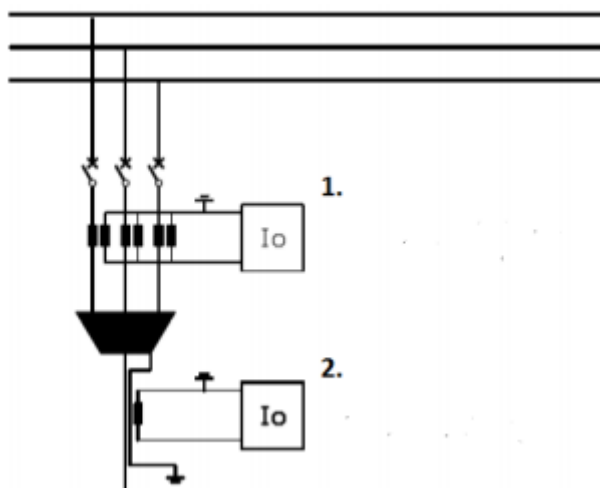


Kuva 15. Nollajännitteen mittausten menetelmät 1. laskennallinen summamittaus, 2. jännitemuuntajien avokolmiokäämitys ja 3. tähtipisteen ja maan välille kytketty jännitemuuntaja. (Muokattu. Fredriksen 2016: 28)

Koillis-Satakunnan Sähköllä on käytössä nollajännitteen mittauksessa kuvassa 16 numerolla 2 esitetty avokolmiomittaus. Koska nollajännite on sama kaikkialla saman päämuuntajan syöttämässä verkossa, ei johtolähtökohtainen nollajännitteen mittaus ole tarpeellinen, vaan mittaus voidaan suorittaa aseman kiskostosta.

Nollavirta saadaan mitattua kaapelivirtamuuntajilla tai vaihevirtaa mittaavien mittamuuntajien summakytkennästä. Kaapelivirtamuuntaja on näistä menetelmistä tarkempi ja sillä voidaan mitata hyvin pieniä, jopa 0,5 A maasulkuvirtoja. Huonona puolena voidaan pitää kaapelivirtamuuntajien heikkoa kuormitettavuutta, mutta pienitaakkaisilla suojareleillä tämä ei yleensä aiheuta ongelmia. Vaihevirtaa mittaavien mittamuuntajien summakytkennän huonoina puolina on epätarkkuus erityisesti pienillä virroilla johtuen niiden suuresta

muuntosuhteesta ja mahdollisista keskinäisistä eroista magnetoimiskäyrissä (ABB 2000: 286-294). Kuvassa 16 on havainnollistettu nollavirran mittaustapoja.



Kuva 16. Nollavirran mittausten menetelmät: 1. virtamuuntajien summakytkeä 2. kaapelivirtamuuntaja. (Fredriksen 2016: 27)

Koillis-Satakunnan Sähkö käyttää kaapelivirtamuuntajia. Näiden käyttö on mahdollista, koska jokainen lähtö tuodaan kennolle kaapelilla.

Lisäksi mittamuuntajat suojaavat mittareita ylikuormitukselta. Mittamuuntajille on määriteltä tarkkuusluokat, joista selviävät virta- ja kulmavirheet. Suojajärjestelmän toiminnassa mitatun informaation vääristymisellä on suuri merkitys suojauksen toiminnassa. Suurin vääristymistä aiheuttava tekijä on virtamuuntajien epälineaarinen magnetoimiskäyrä (Elovaara & Haarla 2011a:198-208).

3.2.2 Katkaisijat

Katkaisijat ovat kojeita, joita käytetään avaamaan ja sulkemaan virtapiiri. Toiminta voi olla automatisoitua tai käsin ohjattua. Vikatilanteissa avautumiskäske tulee suojareleeltä. Katkaisijan toiminnan tulee olla nopeaa ja varmaa. Tavallisimmin katkaisija saa avautumiskäskyn verkossa havaitun maasulun tai oikosulun takia. Katkaisijan tulee kyetä avaamaan ja sulkemaan suurin verkossa esiintyvä vikavirta vaurioitumatta. Katkaisijan kyky

avata ja sulkea oikosulkupiiri on merkittävin ominaisuus, joka erottaa katkaisijan kytkimistä, joilla voidaan katkaista ainoastaan mitoitusvirta.

3.2.3 Apuenergialähde

Apuenergialähde tarvitaan varmistamaan suojauslaitteiden tarvitsema jännite vikatilanteiden aikana. Apuenergialähteenä toimii akusto, jonka avulla katkaisijan ohjaus onnistuu, kun sähkön syöttö muualta ei onnistu (Mörsky 1992: 17).

3.3 Jälleenkytkennät

Jälleenkytkentöjen tarkoitus on selvittää avojohtoverkossa esiintyvät ohimenevät viat. Avojohtoverkon vioista 80–90 % on ohimeneviä. Nämä viat saavat yleensä alkunsa salaman aiheuttamista ylijännitteistä, eläimistä tai johdolle pudonneista risuista. Tällöin syntyvän valokaarivian poistamiseksi täytyy vikapaikka tehdä jännitteettömäksi, niin että valokaari ehtii deionisoitua ja sammua. Pikajälleenkytkennällä (PJK) vikapaikka tehdään jännitteettömäksi ohjaamalla vikapaikkaa syöttävän johdon katkaisija hetkeksi auki ja antamalla valokaarelle mahdollisuus sammua jännitteettömänä aikana. Suurin osa ilmajohdoverkon vioista saadaan poistettua pikajälleenkytkennällä. (Blackburn & Domin 2007: 524)

Mikäli vika ei poistu, ohjataan katkaisija uudelleen auki, mutta tällä kertaa pidemmäksi aikaa. Jännitteetön aika on huomattavasti pidempi kuin PJK-tilanteessa, jotta valokaari ehtii varmasti sammua tai vika muuten poistua. Pitkällä jännitteettömällä ajalla varmistetaan myös, ettei johtimien terminen oikosulkukestoisuus ylity, antamalla johtimelle aikaa jäähtyä. AJK-rele ohjaa katkaisijan uudelleen kiinni ennalta määritellyn ajan kuluttua. Mikäli vika on poistunut, katkaisija jää kiinni. Jos vika ei ole poistunut, katkaisija avautuu lopullisesti. Tällöin valvomoon lähetetään ilmoitus pysyvästä viasta.

3.3.1 Jälleenkytkennät sekaverkoissa

Pelkästään kaapelia sisältävillä johtolähdöillä jälleenkytkentöjen käyttö on tarpeetonta, koska kaapeliverkossa ei esiinny ohimeneviä vikoja, jotka saataisiin selvitettyä jälleenkytkentöjen avulla. Kaapeliverkon viat ovat aina pysyviä ja vaativat siten aina henkilöstön suorittamia korjaustoimenpiteitä. Tästä syystä pelkästään kaapelia sisältävillä lähdöillä jälleenkytkennät ovat pois käytöstä.

Kun lähtö sisältää samalla suojausvyöhykkeellä kaapelin lisäksi myös avojohtoa, on jälleenkytkentöjen käytölle selvä peruste avojohto-osuuksilla ilmenevien ohimenevien vikojen poistamiseksi. Tällöin tulee oikosulkuvioissa kuitenkin ottaa huomioon kaapeleiden huomattavasti pidemmät jäähtymisaikavakiot avojohtoihin verrattuna.

Keskeytyksistä aiheutuneen haitan pienentämiseksi parasta olisi, että johtolähtö kaapeloitaisiin kokonaan tai kaapeloitu osuus muodostaisi oman suojausvyöhykkeensä. Tämä vaatisi kuitenkin maastokatkaisijan asentamista kaapeli- ja avojohtoverkon rajalle. Tällöin kaapeloidun verkon piirissä oleville asiakkaille ei aiheutuisi haittaa avojohto-osuudella tapahtuvista jälleenkytkennöistä.

3.3.2 Hajautetun tuotannon vaikutus keskijänniteverkon maasulkusuojaukseen

Käytössä oleva jakeluverkko perustuu pitkälti keskitettyyn tuotantoon, jossa tehon kulkusuunta on isoista tuotantolaitoksista kohti kuluttajia. Hajautetun tuotannon lisääminen saattaa muuttaa tehon kulkusuuntaa paikallisesti. Tämä asettaa haasteita suojauksen toiminnalle aiheuttaen mahdollisesti, virhelaukaisuja, suojauksen toimimattomuutta tai hidastumista. Hajautetun mikrotuotannon lisääntyminen voi kasvattaa verkon oikosulkuvirtatasoja, koska oikosulkuvirtaa syöttäviä lähteitä tulee lisää. Tuotannon ollessa tehoelektroniikkalaitteiston kautta verkkoon kytkeytyvää, kuten aurinkopaneelijärjestelmät, on oikosulkuvirtatasojen kasvu hyvin pientä, sillä tehoelektroniikka laitteisto kykenee tyypillisesti syöttämään vain hieman nimellisvirtaa suuremman oikosulkuvirran vian aikana (Mäki 2007: 19-20).

Hajautetun tuotannon lisääminen voi myös pienentää verkon oikosulkuvirtoja. Näin tapahtuu, kun tehoelektroniikalla verkkoon liitetty tuotanto korvaa perinteistä tahti-generaattoreihin perustuvaa tuotantoa (Kumpulainen & Ristolainen 2006: 15).

Keskijänniteverkossa tapahtuvaa maasulku ei voida havaita pienjänniteverkon puolella nollajännitteen noususta, sillä jakelumuuntaja katkaisee nollaverkon. Keskijänniteverkon maasulun aikana pienjänniteverkkoon kytkeytyneet mikrotuotantolaitokset jatkavat toimintaansa. Keskijännite lähdön irrottua voi hajautettu tuotanto aiheuttaa saarekkeen vikaantuneeseen verkkoon. Hajautettu tuotanto saattaa jäädä pitämään yllä jännitettä keskijänniteverkossa, jolloin maasulkuvalokaaren sammunen voi estyä tai maasulkuvian kesto pitkittyä (Kumpulainen & Ristolainen 2006: 34). Maasulkuvian keston pitkittyminen hankaloittaa kosketusjännitevaatimusten täyttämistä.

Liitettäessä mikrotuotantoa verkkoon käytetään Loss-of-Mains –suojausta (LoM), jonka tehtävänä on irrottaa mikrotuotanto verkosta jännitteen kadottua. Jälleenkytkentöjen jännitteettömän ajan on kuitenkin oltava niin pitkä, että hajautettu tuotanto ehtii myös irtaamaan verkosta jännitteettömänä aikana. LoM-suojauksen asettelu-aika on tämän hetkessä standardissa EN 50438 määritetty olemaan 0,15 sekuntia. Tällöin jos pikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana käytetään 0,5 sekuntia, on todellinen jännitteetön aika 0,35 s sekuntia, kun huomioidaan LoM-suojauksen viive. Pikajälleenkytkentöjen onnistumiseksi voi olla tarpeen pidentää pikajälleenkytkentöjen jännitteetöntä aikaa lähdöillä, joissa on runsaasti mikrotuotantoa esimerkiksi 0,65 sekuntiin. Mikrotuotannon kytkeytyminen verkkoon tulee tapahtua viiveellä, ettei esimerkiksi kokeilukytkentöjen aikana hajautettu tuotanto kytkeydy takaisin verkkoon ja kasvata turhaan vikavirtaa, mikäli vika sattuu olemaan edelleen verkossa kytkennän aikana. (Lehto 2009: 78-79)

Mikäli halutaan välttää verkon suureiden tarkkailuun perustuvat LoM-suojauksen hitauden aiheuttamat ongelmat suojauksen toiminnalle, on käytettävä tietoliikenneyhteydellä varustettua LoM-suojausta. Tällöin vikaantunutta lähtöä syöttäville hajautettujen tuotantolaitosten LoM-suojille lähetetään viesti verkon viasta, jolloin hajautettu tuotanto voidaan irrottaa verkosta ennen jälleenkytkentää. Nykyisellään tietoliikenneyhteyteen perustuva LoM-suojaus on kallis, sillä se vaatii nopean ja luotettavan tietoliikenneyhteyden.

(Tzelepis, Dysko & Booth 2016: 1) Tulevaisuudessa 5G-verkko tulee tarjoamaan nopean ja luotettavan yhteyden, jonka avulla kaukana toisistaan sijaitsevat laitteet voidaan yhdistää toisiinsa. Nopean ja luotettavan yhteyden avulla toisiinsa kytkeytyvät laitteet muodostavat esineiden internetin. (Kapasa, Touloupou, Stavrianos & Kyriazis 2018) 5G-yhteyden hyödyntämisellä LoM-suojauksessa voidaan välttää lisääntyvän hajautetun tuotannon aiheuttamat ongelmat jälleenkytkennöille.

3.4 Suojauksen selektiivisyys

Suojauksen selektiivisyydellä tarkoitetaan, että vain vikaantunut osa verkosta erotetaan verkosta. Näin sähkönkäyttäjille aiheutuva haitta saadaan minimoitua. Selektiivisyys tarkoittaa myös, että kaikki verkon osat on suojattu jollain suojauslaitteella. (Elovaara & Haarla 2011b: 342) Releitä aseteltaessa yksi tärkeimmistä huomioitavista asioista onkin selektiivisyyden varmistaminen.

3.4.1 Aikaselektiivisyys

Aikaselektiivisyyden käyttö on yksinkertaisin tapa toteuttaa selektiivinen suojaus. Periaatteena on, että aina lähinnä vikakohtaa oleva suojauslaite ehtii toimia ensin. Selektiivisyyden kannalta tärkeä seikka on käyttää riittävän pitkää porrasaikaa. Porrasajalla tarkoitetaan peräkkäisten suojauslaitteiden toiminta-aikojen erotusta. Toisaalta lähellä syöttöpistettä tapahtuvissa vioissa täytyy suojauksen toiminta olla riittävän nopeaa, etteivät johtimien oikosulkukestoisuudet ylity (ABB 2000: 217-219). Porrastusaikaa määritettäessä tulee ottaa huomioon releen toiminta-ajan lisäksi katkaisijan toiminta-aika, valokaariaika ja suojalaitteiden toiminta-aikojen hajonnasta aiheutuva varmuusaika. Aikaselektiivisyys sopii hyvin käytettäväksi johtolähdöillä, joilla ei ole käytössä liian monta peräkkäistä suojausvyöhykettä, muuten ensimmäisen vyöhykkeen toiminta-ajat kasvaisivat liian suuriksi porrasaikojen vuoksi.

Koillis-Satakunnan Sähköllä on käytössä enintään 2 peräkkäistä suojauslaitetta johtolähdöillä. Tällöin porrasaikojen pituus tulisi asetella riittävän pieneksi, sillä suuri porrastus

aiheuttaisi suojauksen toiminta-ajan kasvun liian suureksi ensimmäisellä suojausvyöhykkeellä, jolloin kosketusjännitevaatimusten täyttäminen vaikeutuisi. Useimmiten ensimmäisen suojattavan vyöhykkeen keskijänniteverkko on kaapeloitua taajamaverkkoa, ja toinen vyöhyke koostuu haja-asutusalueen avojohtoverkosta. Tällöin ensimmäinen suojausvyöhykkeen voidaan katsoa muodostavan laajan maadoitusjärjestelmän, jolloin SFS6001 standardin mukaisesti maadoitusjännitteet voivat olla nelinkertaiset sallittuihin kosketusjännitteisiin nähden. Tällöin ensimmäisen suojausvyöhykkeen kosketusjännitevaatimukset on helppo täyttää.

Selektiivisyyden kannalta oleellinen seikka on porrassaika, jolla määritetään pienin mahdollinen aikaviivästyksen ero kahden peräkkäisen suoja-alueen välillä. Jos aikaviivästyksen ero on liian pieni, on vaarana, suojauksen epäselektiivinen toiminta. Porrassaika lasketaan yhtälöllä

$$\Delta t_{DT} = 2 * t_E + t_R + t_{CB} + t_M,$$

jossa Δt_{DT} on porrassaika, t_E on releen toiminta-ajan toleranssi t_R on retardaatio- eli pyörtöaika t_{CB} on katkaisijan toiminta-aika t_M on varmuusmarginaali. Tarvittavat parametrit löytyvät releiden ja katkaisijoiden dokumentoinnista varmuusmarginaalia lukuun ottamatta. Varmuusmarginaalin avulla otetaan huomioon virtamuuntajan kyllästyminen vikavirran DC-komponentin takia (ABB 2000: 219-220). Käytettävät porrassajat ovat yleensä välillä 150-250ms.

3.4.2 Virtaselektiivisyys

Virtaselektiivisyyttä käytettäessä asetellaan suojavyöhykkeen virta-asettelu niin ylös, ettei vian tapahtuessa toisella suojausvyöhykkeellä ensimmäisen vyöhykkeen suoja havahdu. Sopivaa virta-asettelua käytettäessä suoja havaitsee vain omalla alueellaan tapahtuvat viat. Tällöin ei tarvitse käyttää aikaselektiivisyyttä. Virtaselektiivisyydellä voidaan näin ollen toiminta-ajat asettaa haluttaessa minimiin ilman että selektiivisyys vaarantuisi (ABB 2000: 227). Virtaselektiivistä suojausta käytettäessä pitää tuntea suojausalueella

esiintyvät vikavirrat tarkasti, jotta suojaus voidaan toteuttaa. Lisäksi suojausvyöhykkeiden välisten vikavirtatasojen tulee erota toisistaan riittävästi, jotta suojauksen selektiivisyys voidaan luotettavasti toteuttaa.

4 MAASULKUSUOJAUS

4.1 Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskenta

Verkossa esiintyvien maasulkuvirtojen laskeminen on välttämätöntä suunniteltaessa toimivaa maasulkusuojausta. Maasulkuvirtaan vaikuttaa verkon maakapasitanssin lisäksi vuotoresistanssi R_o ja vikavastus R_f . Lisäksi verkon käyttötapa (tähtipisteen maadoitus) vaikuttaa maasulkuvirran laskentaan.

Maasta erotetussa verkossa ei verkon tähtipisteen ja maan välillä ole johtavaa yhteyttä. Suomessa osa keskijänniteverkosta on vielä maasta erotettua. Myös Koillis-Satakunnan sähköllä on Ritarin ja Killinkosken sähköasemien verkot toteutettu maasta erotettuina. Nykyään tällaisen järjestelmän käyttöä vaikeuttavat kiristyneet kosketusjännitevaatimukset ja kasvava kaapelointiaste, minkä vuoksi entistä enemmän maasta erotettua verkkoa muutetaan sammutetuksi.

Terveessä tilassa maasta erotetun verkon vaihejohtimien kautta kulkevien varausvirtojen summa on nolla. Maasulun aikana viallisen vaiheen jännite ja varausvirta pienenevät. Terveiden vaiheiden jännitteet maata vasten nousevat kuten myös varausvirrat. Vaihejännitteet pysyvät ennallaan, eivätkä kuormitukset häiriinny ennen katkaisijan avautumista (Mörsky 1992: 298). Maasulkuvirran I_{ef} suuruus maasulussa, jossa on mukana vikaresistanssia, R_f voidaan laskea yhtälöllä

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} U, \quad (5)$$

missä C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi, ω on jännitteen kulmataajuus ja U on verkon pääjännite. (ABB 2000: 249) Maasulkuvirran suuruus suorassa maasulussa saadaan laskettua sijoittamalla vikavastuksen arvoksi 0Ω . Yhtälön mukaisesti maasulkuvirran suuruus on suoraan verrannollinen maakapasitanssin suuruuteen, mikäli kyseessä

on vikavastukseton maasulku. Jakeluverkoissa käytettäville kaapeleille on laskettu taulukoita, joissa kaapelilajeittain on ilmoitettu maasulkuvirtojen suuruksia pituusyksikköä kohden. Kaapeleiden avojohtoon verrattuna erilaisesta rakenteesta johtuen niiden tuottama maasulkuvirta pituusyksikköä kohti on moninkertainen verrattuna avojohtoon. Avojohtoverkon likimääräisen maasulkuvirran laskemiseen voidaan käyttää yhtälöä

$$I_e \approx \frac{Ul}{300 * 10^6}, \quad (6)$$

missä l on verkon galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus. Kaapeleille vastaavaa likimääräiskaavaa ei ole, sillä niiden tuottama maasulkuvirta pituusyksikköä kohti riippuu voimakkaasti kaapelityypistä sekä poikkipinnasta. Maasulkuvirran aiheuttama jänniteepäsymmetria saa aikaan verkon tähtipisteen potentiaalin nousun maan potentiaaliin nähden. Tätä potentiaalieroja kutsutaan nollajännitteeksi U_0 . Tämä jännite on sama, jonka maasulkuvirta saa aikaan kulkiessaan maakapasitanssien kautta. Maasulussa muodostuva nollajännite voidaan laskea yhtälöllä (ABB 2000: 248-252)

$$U_0 = \frac{1}{3\omega C_0} I_{ef}. \quad (7)$$

Mikäli maasulkupiirissä on mukana vikaresistanssia R_f , se kasvattaa maasulkupiirin impedanssia ja näin pienentää maasulkuvirtaa ja nollajännitettä. Tämä aiheuttaa haasteita suuriresistanssisten maasulkuvikojen havaitsemisessa.

4.2 Maadoitusjännitteet

Standardissa SFS-6001 määritellään seuraavat vaatimukset, jotka maadoitusjärjestelmän tulee täyttää:

- a) Riittävä mekaaninen lujuus ja korroosion kestävyys.
- b) Suurimman vikavirran kestävyys termisesti.
- c) Omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen

- d) Henkilöiden turvallisuuden varmistaminen suurimman maasulkuvirran aikana maadoitusjärjestelmissä esiintyvien jännitteiden suhteen.

Maadoitusten mitoittamisen lähtökohta on riittävän suojaustason saavuttaminen. Maasulkuvirta aiheuttaa maasulkupaikassa maadoitusjännitteen. Maadoitusjännite on vikapaikan ja äärettömän kaukana vikapaikasta sijaitsevan todellisen maapotentiaalin välinen jännite. Maasulkuvirta synnyttää vikapaikan maadoitusresistanssissa maadoitusjännitteen U_e , jonka suuruus saadaan laskettua yhtälöllä

$$U_e = I_e * R_m, \quad (8)$$

missä R_m on vikapaikan maadoitusresistanssi.

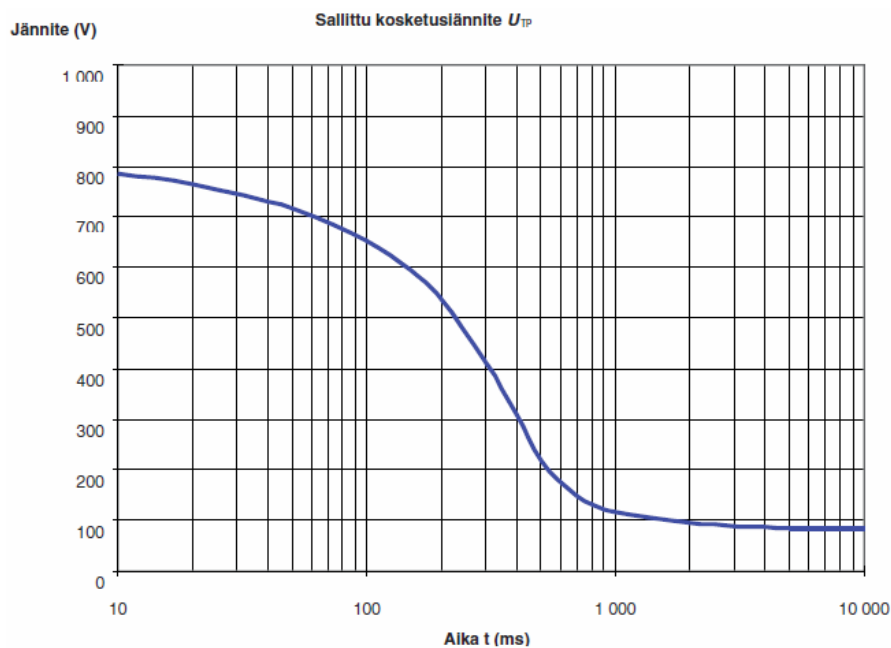
Maadoitusjännite aiheuttaa ihmiseen tai eläimeen kosketeltavissa olevan kosketusjännitteen (Lakervi & Partanen 2009: 187-188). Mikäli maadoitusolosuhteet ovat suotuisat, on maadoitusresistanssi mahdollista saada riittävän pieneksi kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi. Suomessa maadoitusolosuhteet ovat kuitenkin maaperän kivisyydestä johtuen yleensä melko huonoja, mikä hankaloittaa riittävän hyvän maadoitusjärjestelmän rakentamista, jotta kosketusjännitevaatimukset voitaisiin täyttää. Jakeluverkoissa käytetään yleensä kaapeliojiin asennettuja vaakamaadoituksia.

Taulukossa 2 on esitetty standardissa SFS6001 määritetyt suurimmat sallitut kosketusjännitteet U_{Tp} virran vaikutusajan funktiona.

Taulukko 2. Sallitut kosketusjännitteet U_{Tp} virran kestoajan t_f funktiona (SFS 6001 suurjännitesähköasennukset 2015: 107).

| Vian kesto aika t_f s | Sallittu kosketusjännite U_{Tp} V |
|----------------------------|--|
| 0,05 | 716 |
| 0,10 | 654 |
| 0,20 | 537 |
| 0,50 | 220 |
| 1,00 | 117 |
| 2,00 | 96 |
| 5,00 | 86 |
| 10,00 | 85 |

Suurimmat sallitut kosketusjännitteet voidaan myös esittää kuvaajan avulla. Kuvassa 17 on esitetty suurin sallittu kosketusjännite virran kestoajan funktiona.

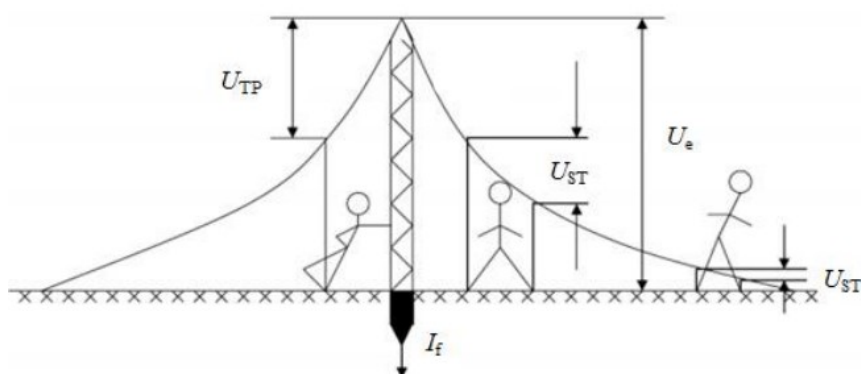


Kuva 17. Suurin sallittu kosketusjännite virran kestoajan funktiona (SFS 6001)

Kuvasta 17 havaitaan, että kosketusjännitteen kestoajalla on suuri vaikutus sallittuun kosketusjännitteeseen. Mikäli virran kesto aika on huomattavasti pidempi kuin 10 sekuntia,

käytetään suurimmalle kosketusjännitteelle arvoa 80 V. (SFS 6001: 97) Jännitteen aiheuttamaa vaaraa tarkasteltaessa lähtökohtana pidetään sydänkammiovärinän rajavirtakäyriä ja jännitteestä riippuvaa kehon resistanssin arvoa. Kosketusjännitteelle altistuminen saa aikaan kehossa kulkevan virran, jonka vaarallisuus riippuu virran suuruudesta ja vaikutusajasta. Virran vaikutusajan jäädessä alle sydänjakson pituuden 0,75 s pienenee sydänkammiovärinän riski merkittävästi, ja tällöin voidaan sallia korkeammat kosketusjännitteet (Elovaara & Haarla 2011b: 499-502).

Kuvassa 18 on havainnollistettu kosketus- ja askeljännitteiden muodostuminen vikapaikan läheisyydessä. Kosketusjännitteellä tarkoitetaan ihmisen keholla samanaikaisesti kosketettavan kahden osan tai kohdan välistä, kehoon vaikuttavaa jännitettä. Kosketusjännitettä, joka esiintyy kahden jaloilla samanaikaisesti kosketeltavan pisteen välillä, kutsutaan askeljännitteeksi. Yleensä maadoitusjännitteestä U_e vai osa esiintyy kosketusjännitteinä U_{TP} ja askeljännitteinä U_{ST} (Elovaara & Laiho 1999: 414).



Kuva 18. Vikapaikan läheisyydessä muodostuvat kosketus ja askeljännitteet (Elovaara & Laiho 2005: 414).

Kuvan 18 mukaista potentiaalikenttää kutsutaan muotonsa vuoksi potentiaalisuppiloksi. Kentän vaikutuksesta jalkojen välille muodostuu potentiaaliero, joka vaikutus on suurimmillaan vikapaikan lähellä. Lisäksi suuruuteen vaikuttaa askeleen vikapaikan säteen suuntaisen komponentin pituus.

Askeljännitteiden sallitut arvot ovat hieman suurempia kuin kosketusjännitteiden sallitut arvot. Tällöin voidaan olettaa, että kosketusjännitevaatimusten täyttyessä myös askeljännitevaatimukset täyttyvät. Järjestelmän sallittu maadoitusjännite U_e lasketaan sallitusta kosketusjännitteestä U_{TP} yhtälöllä

$$U_e \leq k * U_{TP}, \quad (9)$$

missä k on maadoituksen rakenteesta riippuva kerroin. Standardissa SFS6001 määritellään maasulkukertoimille arvo, joka normaalisti on kaksi. Mikäli maadoitusjännitevaatimusten täyttäminen ei onnistu maaperän huonon johtavuuden vuoksi käyttäen maasulku-kerrointa kaksi, voidaan käyttää kerrointa neljä, mikäli kyseessä on muuntopiiri, jossa suurjännitepuolen maadoitusta ei ole yhdistetty pienjännitepuolen maadoituksiin, jos seuraavat ehdot toteutuvat samanaikaisesti:

- Muuntopiirin alueella maaperä on pääosin huonosti johtavaa.
- Syöttävässä suurjänniteverkossa käytetään laukaisevaa maasulkusuojausta
- Muuntajan yläjännitepuolen suoran maasulun todennäköisyyttä on pienennetty käyttämällä, silloin kun ylijännitesuojaus on tarpeen, virtaa rajoittavia ylijännitesuojia pelkkien kipinävälien sijasta ja eristämällä muuntajan navat ja liitännät johdot tai käyttämällä koteloituja muuntamoita. Pylväsmuuntamon erottimen napoja ei kuitenkaan tarvitse eristää
- Muuntamolla käytetään potentiaalin ohjausta
- Jokaisessa pienjänniteverkon haarassa on vähintään yksi johtohaaran maadoitus, ja lisäksi pienjännite verkon maadoitukset täyttävät SFS 6000-8-801 vaatimukset
- Pienjänniteverkosta ei syötetä kouluja, leirintäalueita ja muita vastaavia kohteita, joiden ulkotiloissa voi oleskella runsaasti ja usein ihmisiä

Maadoitukset voidaan suunnitella normaalien kytkentätilanteiden mukaan. Verkkoa käytettäessä on huolehdittava siitä, että vaatimukset täyttyvät myös poikkeuksellisissa kytkentätilanteissa, esim. kun yhteen on liitetty normaalia laajempi maakaapeliverkko, tai maasulun sammutuskela on pois käytöstä (SFS 6001 2015: 146).

4.3 Maadoitusjännitteiden hallinta

Viime vuosien aikana sähköverkkoyhtiöt ovat toimitusvarmuutta parantaakseen kaapeleineet paljon keskijänniteavojohtoverkkoa. Tällöin verkko ei ole enää alttiina myrskyjen ja lumikuorman aiheuttamille vioille. Näin saadaan myös avojohtojen aiheuttamaa maisemahaittaa pienennettyä. Jokaisella johdintyypillä on omat sähköiset arvonsa, jotka vaikuttavat johtimen tuottamiin maasulkuvirtoihin. Kaapeleilla myös poikkipinta vaikuttaa merkittävästi maasulkuvirtaan.

Lisättäessä maakaapeliverkkoa sähköaseman johtolähtöihin kasvavat maasulkuvirta arvot kaapelityypistä riippuen 1,9-3,5 A/km. Mikäli avojohtoverkkoa muutetaan PAS-johdoksi, pienenevät maasulkuvirrat noin 18 % verrattuna vastaavaan avojohtoon. Korvattaessa vanhoja paperieristeisiä APYAKMM-kaapeleita vastaavilla AHXAMK-W -kaapeleilla pienenevät maasulkuvirrat noin 38 %. Maasulkuvirtojen kasvaessa kasvavat myös maadoitusjännitteet. Tämä saattaa johtaa tilanteeseen, jossa suurin sallittu kosketusjännite ylittyy.

Maadoitusjännitteitä voidaan alentaa parantamalla maadoituksia, jolloin maadoitusresistanssi R_m pienenee. Maadoitusresistanssi on suoraan verrannollinen maan resistiivisyyteen, joka Suomessa on suuri, johtuen lähelle maan pintaa ulottuvasta kallioperästä. Lisäksi ohut maakerroskin on yleensä huonosti johtavaa soraa tai hiekkaa (Elovaara & Laiho 1999: 414). Maadoituselektrodien lisäämisellä ei todella huonoissa maadoitusolosuhteissa, kuten kivisessä maastossa, saavuteta merkittävää parannusta maadoitusresistanssiin. Hyvissä maadoitusolosuhteissa, kuten savimaastossa, maadoitusresistanssin pienentäminen onnistuu lisäämällä maadoituselektrodeja.

Maadoitusjännitteitä voidaan myös pienentää lyhentämällä galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituutta. Tällöin verkon maakapasitanssi pienenee ja näin myös maasulkuvirta. Tämä keino vaatii usein investoimista uuteen päämuuntajaan ja osan vanhasta verkosta siirtämistä uuden päämuuntajan syötettäväksi. Maasulkuvirran rajoituskeinona tämä jär-

jestely on erittäin kallis ja siksi harvoin käytetty. Myös johdinten vaihto vähemmän maasulkuvirtaa tuottaviin on niin kallis vaihtoehto, saavutettuun maasulkuvirran pienentämiseen nähden, ettei se ole yleensä kannattavaa.

4.4 Maasulkuvirran kompensointi

Tehokas tapa rajoittaa maasulkuvirtaa on käyttää maasulkuvirran kompensointilaitteistoja. Tätä menetelmää kutsutaan myös maasulkuvirran sammutukseksi. Nimitys tulee siitä, että maasulkuvirran jäädessä pieneksi paranevat mahdollisuudet valokaarimaasulun itsestään sammumiseen. Valokaarimaasulun sammussa itsestään vältytään myös sähkökäyttäjille haitallisten pikajälleenkytkentöjen tekemiseltä. Kompensointikuristimesta käytetään myös nimitystä Petersenin kela, keksijänsä Waldemar Petersenin mukaan. Kompensointikuristin on kela, joka liitetään verkon tähtipisteen ja maapotentiaalin väliin. Päämuuntajien kolmiokytkentäisestä toisiokäämistä johtuen joudutaan yleensä käyttämään Zn-kytkentäistä maadoitusmuuntajaa, jolla luodaan verkkoon tähtipiste, johon kompensointikuristin voidaan kytkeä. Maadoitusmuuntaja voidaan varustaa lisäksi erillisellä omakäyttökäämityksellä, jolla saadaan tarvittava omakäyttösähkö. Maadoitusmuuntajan nimellisteho mitoitetetaan yleensä vähintään yhtä suureksi kuin sammutuskelan nimellisteho. Sammutuslaitteistoon kuuluu itse kelan ja maadoitusmuuntajan lisäksi säätäjä ja rinnakkaisvastus. Säätäjän tehtävänä on muuttaa kelan induktanssia, jotta verkon kompensointia pysyisi halutussa arvossa.

Verkon kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti sijoittamalla yksi iso säädettävä sammutuskuristin sähköasemalle tai useita pieniä kiinteitä sammutuskuristimia johtolähdöille. Taajamaverkoissa, joissa johtolähdöt ovat koostuvat useista lyhyistä kaapelilähdöistä, on yleisesti käytetty keskitettyä maasulkuvirran sammutusta. Hajautetut sammutuskuristimet kompensoivat osan oman johtolähtönsä maasulkuvirrasta. Kytkettäessä jokin johtolähtö irti verkosta kytkeytyy myös kompensointikuristin irti verkosta. Tällöin ei ole vaaraa, että verkko tulisi ylikompensoiduksi. Myös korvauskytkentätilanteissa, kun

johtolähtö siirretään toisen aseman syöttämän verkon perään, siirtyy myös sammutusku-
ristin, eikä näin ollen korvauskytkentätilanteissa tarvita korvaavalta verkolta lisää maa-
sulkuvirran kompensointikykyä.

Sammutetussa verkossa kapasitanssien kautta kulkeva virta I_C ja sammutus kelan kautta
kulkeva virta I_L ovat 180° vaihesiirrossa toisiinsa nähden. Tällöin vikavirta I_f kumoutuu
lähes täysin. Ainoastaan pieni resistiivinen osa vikavirrasta jää jäljelle. Kuvassa 19 on
havainnollistettu kompensoinnin maasulkuvirtaa pienentävää vaikutusta. Kuvassa sam-
mutuskelan induktiivinen virta I_L on mitoitettu hieman pienemmäksi kuin kapasitiivinen
virta I_C , jolloin vikavirta I_f saadaan näiden erotuksesta lisättynä vikavirran resistiivisellä
komponentilla I_R . Maasulkuvirran resistiivisen komponentin kasvattamiseen käytetään
sammutuskuristimen rinnalle kytkettyä vastusta. Tällä varmistetaan, että suojareille saa-
daan riittävän suuri virta vian havaitsemiseksi ja lisäksi helpotetaan vikaantuneen lähdön
tunnistamista, sillä vikaantuneen lähdön nollavirran osoitin kääntyy lähemmäs $-U_0$ osoi-
tinta.

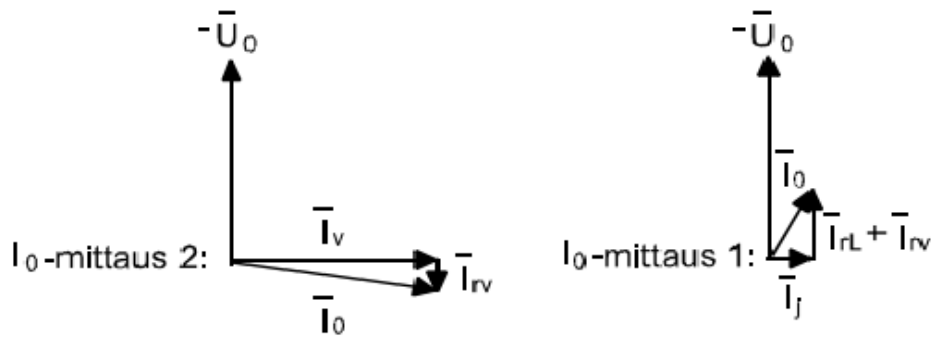


Kuva 19. Virran osoittimet alikompensoidunverkon maasulussa (Guldbrand 2009:30).

Täysin kompensoidussa verkossa virrat I_L ja I_C ovat yhtä suuret, kun kelan induktiivinen
reaktanssi mitoitetaan siten että yhtälö

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C} \quad (10)$$

toteutuu. Kuvassa 20 on esitetty maasulkuvirran muodostuminen sammutetussa verkossa
käytettäessä keskitettyä maasulkuvirran kompensointia.

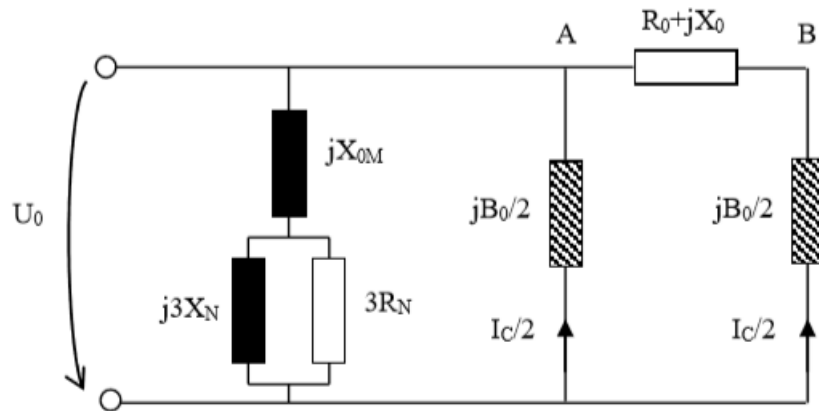


Kuva 20. Johtolähtöjen nollavirta mittaus, jossa virran positiivinen suunta on kiskosta johdolle päin (ABB 2000: 255).

Kuvassa 20 I_{rv} kuvaa verkon häviöitä, ja I_{rL} kuristimen häviöitä.

4.4.1 Kaapelointisteen kasvun vaikutus maasulkuvirran resistiiviseen komponenttiin

Kapasitiivisen varausvirran lisäksi pitkissä kaapeloiduissa lähdöissä kulkee maasulussa myös resistiivistä virtaa suhteessa nollajännitteeseen, nollajännitteen synnyttämän virran kulkiessa kaapelin nollaimpedanssin läpi. Suuret varausvirrat aiheuttavat jännitehäviöitä johtojen sarjaimpedansseissa. Verkon maasulun aikana tuottaman vikavirran resistiivisen komponentin selvittäminen laskennallisesti on haastavaa, koska kaapeliosuuksien nollaimpedansseja ei tunneta taulukkoarvoina. Kuvassa 21 on esitetty nollaverkon sijaiskytkentä, kaapelin nollapiiri on kuvattu π -sijaiskytkennän avulla.



Kuva 21. Nollaverkon tarkasteluun soveltuva sijaiskytkentä (Nikander & Mäkinen 2017: 8)

Kuvassa X_{0M} on päämuuntajan nollareaktanssi, R_N on lisäkuormitusvastuksen resistanssi, X_N on sammutuskuristimen reaktanssi, B_0 kaapelin maasuskeptanssi, R_0 kaapelin nollaresistanssi ja X_0 kaapelin nollareaktanssi. Lähdön alkupään maasuskeptanssin yli vaikuttaa nollajännite U_0 , mutta loppupään suskeptanssin yli vaikuttava jännite onkin pienempi. Tämä johtuu varausvirran $I_c/2$ synnyttämästä jännitehäviöstä sen kulkiessa kaapelin nol-laimpedanssin läpi. Tällöin vikavirtaan muodostuu kapasitiivisen komponentin lisäksi resistiivinen komponentti (Nikander & Mäkinen 2017: 8) Lähdön pituudella on suuri vaikutus resistiivisen komponentin suuruuteen. Lähdön pituuden tuplaantuessa tuplaantuu myös kaapelin sarjaimpedanssi. Myöskin kaapelin varausvirta I_c tuplaantuu kaapelin suskeptanssien $B_0/2$ tuplaantuessa. Tällöin voidaan pisteiden A ja B välisen jännitehäviön sekä resistiivisen komponentin olettaa nelinkertaistuvan.

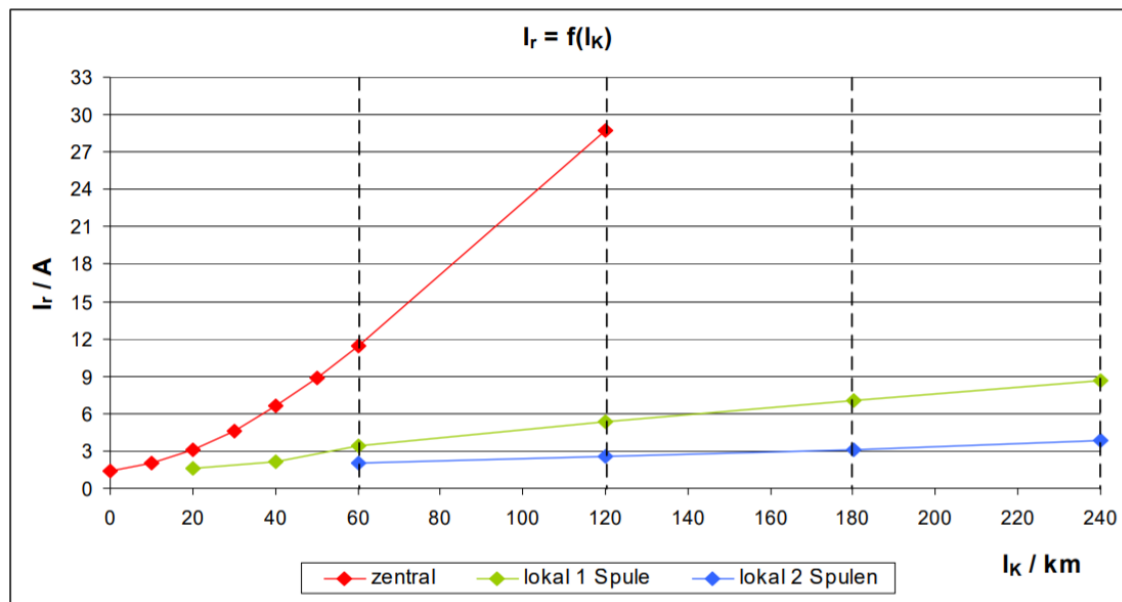
Sammutetun verkon maasulkusuojauksen perustuessa vikavirran resistiiviseen komponenttiin, ei resistiivisen komponentin kasvu heikennä suojauksen toimivuutta. Resistiivisen komponentin kasvu lisää kuitenkin vikakohdan jännösvirtaa ja sitä kautta kasvattaa maadoitusjännitteitä.

4.4.2 Hajautetun kompensoinnin käyttö laajoissa kaapeliverkoissa

Maaseutuverkko eroaa kaupunki- ja taajamaverkoista johtolähtöjen pituuden osalta. Taajamissa verkko koostuu useista lyhyistä ja suuripoikkipintaisista kaapeleista, kun taas

maaseutuverkko koostuu muutamista pitkistä lähdoistä. Kun näitä lähtöjä kaapeloidaan, muodostuu huomattavasti pidempiä kaapelilähtöjä kuin taajamaverkoissa. Tällöin kaapeleiden pitkittäisresistanssien vaikutus maasulkuvirtaa tulee ottaa huomioon. Maasulkuvirran resistiivistä komponenttia ei voida kompensoida pois, mutta sen muodostumista voidaan vähentää käyttämällä johtolähtöjen varrelle sijoitettuja hajautettuja sammutuskuristimia. Tällöin lähdöllä syntyvä maasulkuvirta kompensoidaan paikallisesti, eikä se kulje johdon pitkittäisresistanssia pitkin kohti sähköasemaa.

Resistiivisen komponentin muodostumisessa oleellista on lähdön pituus. Lähdön pituuden kasvaessa kasvaa sen tuottama maasulkuvirran resistiivinen komponentti eksponentiaalisesti. Lähdön pituuden kasvaessa riittävästi ei pelkän keskitetyn maasulkuvirran kompensoinnin avulla enää saada pidettyä jäännösmaasulkuvirtaa kurissa. Kuvassa 22 on esitetty maasulkuvirran resistiivinen komponentti lähdön pituuden funktiona ilman hajautettua kompensointia, käytettäessä yhtä ja käytettäessä kahta hajautettua kuristinta.



Kuva 22. Maasulkuvirran resistiivisen komponentin suuruus johtopituuden funktiona ilman hajautettua kompensointia, yhdellä ja kahdella hajautetulla kuristimella (Lehtonen, Saarijärvi & Nurminen 2010: 24).

Kuvasta voidaan päätellä, että alle 20 km pituisilla lähdoilla resistiivisen komponentin osuus maasulkuvirrasta ei ole merkittävä, eikä hajautetun maasulkuvirran kompensoinnin käyttö resistiivisen komponentin pienentämiseksi ole tarpeen. Mikäli lähdön kaapeliosuuden pituus ylittää 20 km, on hajautetun kompensoinnin käytölle selkeä tarve, sillä suuri resistiivinen komponentti kasvattaa maasulun aikaisia vaarajännitteitä ja heikentää valokaarimaasulkujen itsestään sammumisen todennäköisyyttä.

4.5 Maasulkusuojauksen toteutus

Maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa maasulkusuojauksen toteutukseen ei voida käyttää virran suuruuden mittaukseen perustuvaa suojauksia kuten oikosulkusuojauksessa. Maasulkuvirta on kuormitusvirtaa huomattavasti pienempi. Maasulkuvian indikointiin voidaan käyttää seuraavia menetelmiä:

- Perustaajuuden nollajännitteen U_0 muutos verrattuna terveentilan nollajännitteeseen
- Perustaajuuden vaihejännitteen muutos
- Perustaajuinen summavirta
- Summavirran ja nollajännitteen välinen kulma (Lakervi & Partanen 2009: 190)

Maasulkusuojauksen hälytys- tai erotuslaitteen on toimittava maasulussa, jossa vikaresistanssi on enintään 500Ω . On kuitenkin suositeltavaa, että maasulun hälytys- tai erotuslaite toimisi niin suurella vikaresistanssilla kuin vain on teknisesti mahdollista toteuttaa (ABB 2000: 258).

Suojauksen nopea toiminta mahdollistaa suuremmat kosketusjännitteet kuvan 17 mukaisesti.

4.5.1 Nollajännitteen ja nollavirran suuruus

Nollajännite voidaan mitata jännitemuuntajan avokolmiokäämityksestä tai verkon tähtipisteen ja maan välille kytketyn yksivaihemuuntajan toisiosta. Avokolmiojännite muodostuu vaiheiden ja maan välisten jännitteiden summasta.

Verkossa tapahtuva maasulku aiheuttaa aina nollajännitteen nousun terveen tilan arvoon verrattuna. Nollajännitettä voidaan käyttää maasulun yleishälytyksen toteuttamiseen. Nollajännitteen avulla voidaan havaita myös suuriresistanssiset maasulut. Nollajännite voidaan laskea yhtälöllä

$$U_0 = \frac{U_v}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}}, \quad (11)$$

missä C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi (ABB 2000: 252). Yhtälöstä havaitaan, että maakapasitanssin ja vikaresistanssin kasvu pienentää nollajännitettä.

Kompensoidussa verkossa nollajännite on huomattavasti suurempi kuin maasta erotetussa verkossa. Lisäksi kaapelin suuremman maakapasitanssin takia nollajännite maasulussa on kaapeliverkossa huomattavasti pienempi kuin vastaavan pituisessa avojohtoverkossa.

Nollajännitteen nousu avojohtoverkoissa mahdollistaa suuriresistanssisten maasulkuvikojen havaitsemisen. Kaapelia sisältävissä verkoissa nollajännite jää suuriresistanssisissa maasulkuvioissa alhaiseksi. Tällöin nollajännitereleen asetteluarvo pitää olla hyvin pieni, jotta mahdollisimman suuriresistanssiset maasulkuviat voidaan havaita. Asetteluarvolle alarajan määrää releen herkkyys ja verkon terveen tilan nollajännite. Erityisesti vuorottelemattomissa sammutetuissa avojohtoverkoissa saattaa terveen tilan suhteellinen nollajännite olla jopa kymmeniä prosentteja. Terveen tilan nollajännitettä voidaan pienentää tähtipistevastuksella (Mörsky 1992: 319-328).

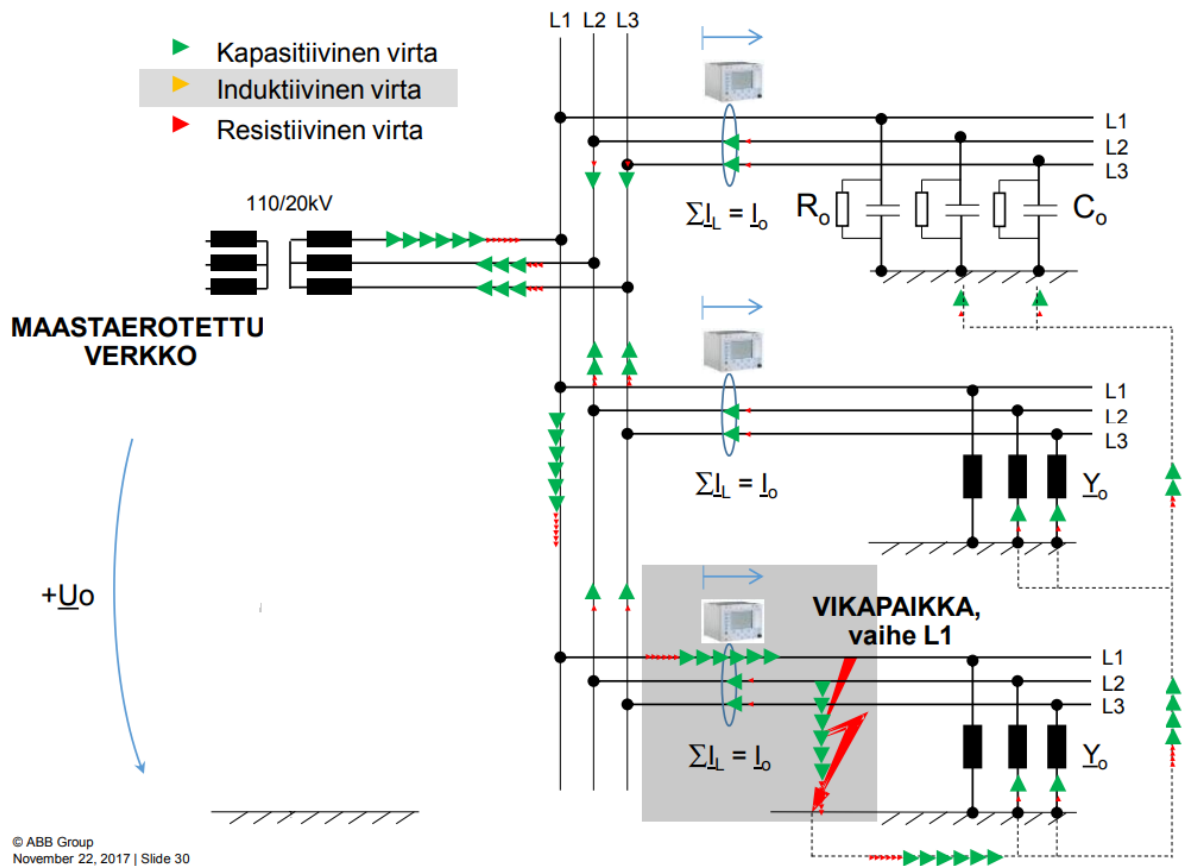
Todella laajoissa maasta erotetuissa sekaverkoissa saattaa nollajännitteen nousu jäädä suuriresistanssisissa maasuluissa niin matalaksi, ettei sen perusteella voi luotettavasti havaita maasulkuvikoja. Toisaalta todella laajoja sekaverkkoja ei yleensä käytetä maasta

erotettuna kosketusjännitevaatimusten vuoksi. Sammutetuissa verkoissa suuriresistanssinenkin vika aiheuttaa huomattavasti suuremman nollajännitteen kuin maasta erotetussa verkossa (Mörsky 1992:328).

Kun useasta johtolähdöstä koostuvassa verkossa yhdellä johtolähdöllä sattuu vikaresistanssiton yksivaiheinen maasulku, syöttävät terveet johtolähdöt maasulkuvirtaa maakapasitanssiensa suhteessa. Terveiden johtolähtöjen nollavirtareleet mittaavat tällöin vain kyseisen johtolähdön syöttämän maasulkuvirran. Vikaantuneen johtolähdön nollavirtarele mittaa virran, joka on terveiden johtolähtöjen syöttämän maasulkuvirran suuruinen. Vikaantuneen johtolähdön itse tuottama maasulkuvirta kulkee kaapelivirtamuuntajan läpi kahdesti eri suuntiin. Nollavirran suuruus vioittuneen lähdön nollavirtareleen mittaama voidaan laskea yhtälöllä

$$I_r = \frac{C - C_j}{C} I_f, \quad (12)$$

missä C on koko galvaanisesti yhteen kytketyn verkon maakapasitanssi, ja C_j on vikaantuneen lähdön maakapasitanssi (Lakervi & Partanen 2009: 191). Kuvassa 23 on havainnollistettu nollavirtareleiden mittaamia virtoja, kun kolme johtolähtöä sisältävässä verkossa alimmalla johtolähdöllä vaiheessa L1 sattuu vikaresistanssiton maasulku.



Kuva 23. Johtolähtöjen maasulkuvirrat yksivaiheisen vikaresistanssittoman maasulun aikana maasta erotetussa verkossa (muokattu Wahlroos 2017).

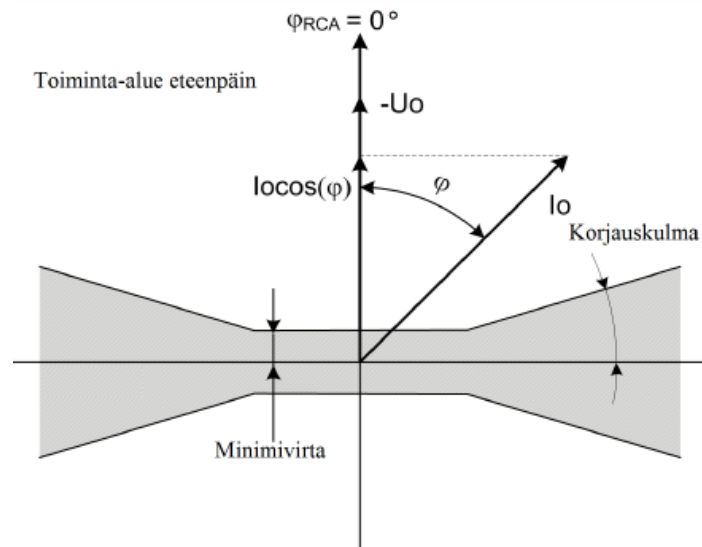
Kuvassa 23 esitettyssä tilanteessa jokaisen johtolähdön tuottamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa ja sen suuntaa on havainnollistettu vihreillä nuolilla ja vastaavasti virran resistiivistä komponenttia punaisiin nuolin. Kyseinen verkko koostuu kolmesta sähköisiltä ominaisuuksiltaan samanlaisista johtolähdöistä, joista alimmassa tapahtuu yksivaiheinen vikaresistanssiton maasulku. Terveiden johtolähtöjen nollavirta koostuu kahdesta yksiköstä kapasitiivista virtaa ja kahdesta yksiköstä resistiivistä virtaa, joiden suunnat ovat kiskostoon päin. Vikaantuneen johtolähdön mitattu nollavirta koostuu koko verkon tuottamasta maasulkuvirrasta, josta on vähennetty vikaantuneen lähdön itsensä tuottama maasulkuvirta. Päämuuntajan toisiopuolen tähtipisteen ja maapotentiaalin välinen muodostunut nollajännitettä on kuvattu U_o , joka maasta erotetun verkon vikaresistanssittoman maasulun aikana saa vaihejännitteen suuruisen arvon. Maasta erotetussa verkossa, jossa suurimman maasulkuvirran tuottaman lähdön maasulkuvirta on vähemmän kuin puolet koko verkon yhteensä tuottamasta maasulkuvirrasta on mahdollista toteuttaa selektiivinen

maasulkusuojaus käyttäen pelkästään nollavirran mittausta. Tällöin lähtö mittaa vain lähdön itsensä tuottaman maasulkuvirran vian sijaitessa tausta verkossa. Selektiivinen maasulkusuojaus olisi tällöin mahdollista toteuttaa käyttäen pelkästään nollavirtaa tarkkailevia suojareleitä. Vian sijaitessa kyseisellä lähdöllä mittaa suojarele koko taustaverkon tuottaman maasulkuvirran, joka on suurempi kuin lähdön itsensä tuottama. Kyseinen suojausmenetelmä tosin ei toimisi verkon kytkentätilateiden muuttuessa, tai kun maasulkuvirta olisi pienentynyt vikaresistanssin vuoksi. Sammutetussa verkossa menetelmän käyttö johtolähtöjen suojaukseen ei toimisi ollenkaan.

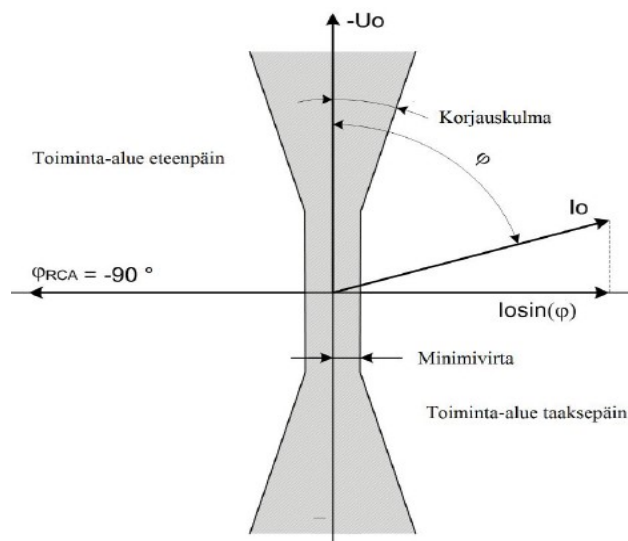
Pelkkää nollavirran mittausta voidaan käyttää tunnistamaan, sijaitseeko vika mittauksen takana vai muualla verkossa. Tällöin mittauksen takana olevan verkon tuottaman maasulkuvirran täytyy olla reilusti pienempi kuin muun verkon. Kyseistä menetelmää käytetään muun muassa vikaantuneen johtohaaran tunnistamiseen. Ilmajohtohaarojen tuottama maasulkuvirta on muun verkon tuottamaan maasulkuvirtaan verrattuna niin pieni, että vika voidaan luotettavasti määrittää sijaitsemaan haarajohdolla tai taustaverkossa.

4.5.2 $I_0\sin$ - ja $I_0\cos$ -periaate maasulkusuojauksessa

$I_0\sin$ - ja $I_0\cos$ -periaate vastaa muuten kulmaperiaatetta, mutta nollajännitteen ja nollavirran välisen kulman mittaamisen sijaan mitataan resistiivisen tai kapasitiivisen komponentin osuutta nollavirrasta. Komponentti saadaan nollavirran ja $\sin(\varphi)$ tai $\cos(\varphi)$ tulona. $I_0\sin$ -periaatetta käytettäessä saadaan lasketuksi nollavirran kapasitiivinen osuus, jolloin menetelmää käytetään maasta erotetuilla verkoilla. $I_0\cos$ -periaatetta käytettäessä saadaan lasketuksi nollavirran resistiivinen osuus, jolloin menetelmää käytetään sammutetuilla verkoilla. Kuvassa 24 on havainnollistettu $I_0\cos$ - ja kuvassa 25 $I_0\sin$ periaatetta.



Kuva 24. *Icos*-periaate ja suojauksen toiminta-alue, muokattu (ABB 2014)

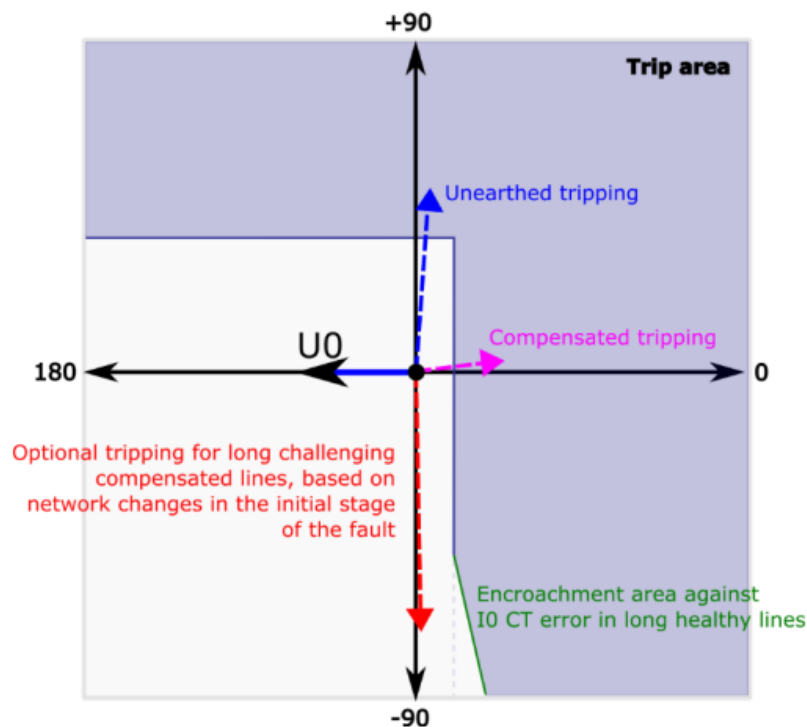


Kuva 25. *Iosin*-periaate ja suojauksen toiminta-alue, muokattu (ABB 2014)

Suojattaessa säteittäistä verkkoa on käytössä ainoastaan eteenpäin oleva toiminta-alue, koska sähkön syöttö tapahtuu vain yhdestä suunnasta.

4.5.3 Maasulkusuojauksen laajakulma-asettelu

Laajakulma-asettelua käytettäessä yhdistetään $I_0\sin$ - ja $I_0\cos$ -toiminta-alueet ja näin muodostuu laajakulma-asettelu. Tällöin maasta erotetulle ja kompensoidulle verkolle ei tarvita erillisiä suojausfunktioita. Kuvassa 26 on esitetty laajakulmaisen maasulkusuojauksen toiminta-alueet.



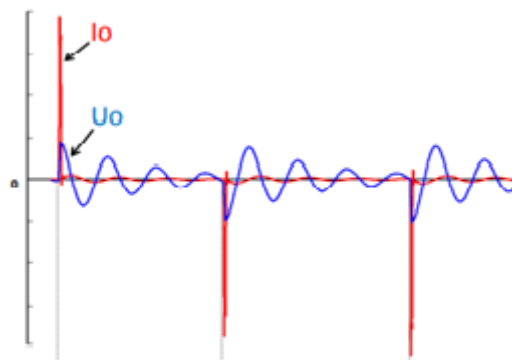
Kuva 26. Laajakulmaisen maasulkusuojauksen toiminta-alueet (Fredriksen 2016: 43)

Laajakulmaista suojausfunktioita käytettäessä ei releelle tarvitse tuoda tietoa, onko verkko maasta erotettu vai sammutettu. Laajakulmaista suojausfunktioita käytettäessä tulee kiinnittää huomiota siihen, että verkon nollajännite käyttäytyy eri lailla niin terveessä tilassa kuin myös vikatilassa verkon ollessa maasta erotettu tai kompensoitu. Laajakulmainen suoja toimii hyvin myös alikompensoidussa verkossa. Tällöin suojaus toimisi myös korvauskytöntilanteissa, jossa korvaavan sähköaseman sammutuslaitteisto ei riitä kompensoimaan verkon kasvanutta maasulkuvirtaa.

4.5.4 Katkeileva maasulku

Katkeileva maasulku on nimensä mukaisesti maasulkuvika, joka kestää lyhyen aikaa, poistuu ja uusiutuu jälleen. Tyypillisesti katkeilevat maasulut ovat kaapeliverkoissa esiintyviä eristevikoja. Eristeen vikaantumista aiheuttaa kaapelin ikääntyminen, mekaaniset ja sähkökentän aiheuttamat rasitukset, sekä kaapeliin valmistuksen tai asennuksen aikana syntyneet vauriot. Jossain vaiheessa kaapelin eristeen jännitelujuus heikkenee niin paljon, että vaihejännite lyö läpi aiheuttaen maasulun.

Katkeileva maasulku sammuu itsestään virran luonnollisessa nollakohdassa syttyen taas uudelleen muutaman jakson kuluttua viallisen vaiheen vaihejännitteen palaututtua riittävän korkeaksi läpilyönnin tapahtumiseksi. Tällöin nollavirran epäsäännöllisyys aiheuttaa nollavirtaan lyhytkestoisia piikkejä. Läpilyönnin tapahduttua nollajännite nousee nopeasti, mutta palautuminen terveen tilan arvoon kestää kauemmin. Läpilyönnin tapahtuessa vikaantunut vaihe joutuu johtavaan yhteyteen maan kanssa valokaaren kautta. Tällöin vikaantuneen vaiheen kapasitanssiin varautunut energia purkautuu vaihejännitteen pudotessa. Vastaavasti terveiden vaiheiden jännitteet nousevat, ja tällöin niiden kapasitansseihin varautuu enemmän energiaa. Kuvassa 27 on havainnollistettu nollajännitteen, nollavirran ja viallisen vaiheen vaihejännitteen käyttäytymistä katkeilevan maasulun aikana.

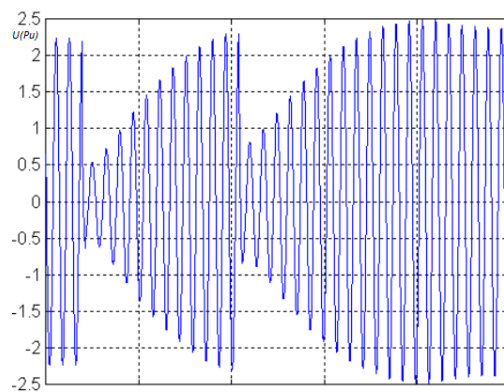


Kuva 27. Nollavirta ja nollajännite katkeilevan maasulun aikana (muokattu Altonen et al. 2003:1).

Kuvasta 27 havaitaan, että maasulun sammuttua nollajännite pysyy usean jakson ajan koholla. Perinteisille suojarille tällainen epäsäännöllinen nollavirta aiheuttaa haasteita.

Suunnatut maasulkusuojat eivät havaitse vikaa nollavirran epäsäännöllisyyden lyhyen keston vuoksi, kun taas aseman varasuojauksena käytettävä nollajänniterele saattaa havaita jatkuvasti koholla olevasta nollajännitteestä ja tehdä koko aseman jännitteettömäksi. (Kuisti, Altonen, Svensson & Isakson 1999: 3)

Läpilyönnin aikana vikaantuneen vaiheen ja maan välinen jännite putoaa välittömästi, mutta maasulun sammuttua vaiheen ja maan välisen jännitteen palautuminen normaaliin arvoon kestää useiden jaksojen ajan. Kuvassa 28 on havainnollistettu vikaantuneen vaiheen ja maan välisen jännitteen käyttäytymistä katkeilevan maasulun aikana.



Kuva 28. Vikaantuneen vaiheen ja maan välinen jännite katkeilevan maasulun esiintyessä. (muokattu. Kuisti et al. 1999: 2)

Kuvasta havaitaan maasulun syttyvän uudestaan, kun vikaantuneen vaiheen ja maan välinen jännite on palautunut riittävän suureksi läpilyönnin tapahtumiseksi.

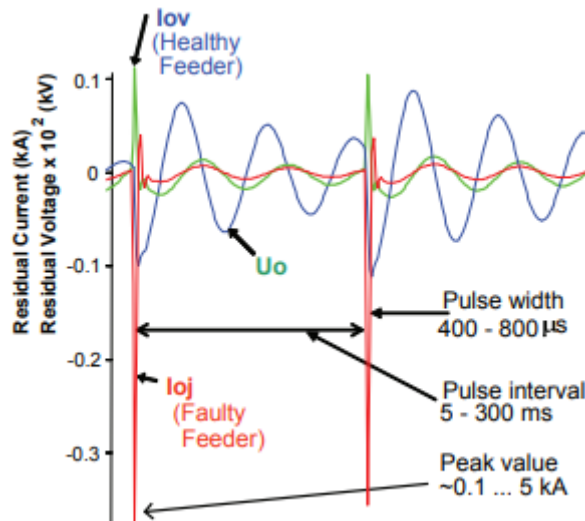
Katkeilevaa maasulkua pidetään yleensä kaapeliverkkojen vikana, mutta sitä voi esiintyä myös avojohtoverkoissa. Avojohto verkoissa katkeilevaa maasulkua saattaa aiheuttaa maahan pudonnut johdin, vaurioitunut eristin tai linjaan osuvat puut. Katkeilevaa maasulkua esiintyy kuitenkin erityisesti sammutetuissa kaapeliverkoissa (Kuisti et al 1999: 4).

Sekaverkot, joissa osa verkosta on kaapelia ja osa avojohtoa ovat Kuistin (1999: 3) mukaan kaikkein alttiimpia katkeileville maasuluille, koska avojohto-osuuksilla usein tapah-

tuvat maasulkuviat aiheuttavat terveiden vaiheiden vaihejännitteiden nousun, mikä rasittaa kaapeleiden eristeitä. Kaapeleissa olevat heikoimmat kohdat kehittyvät tällöin todennäköisemmin katkeileviksi maasuluiksi.

Katkeilevan maasulun aikana terveen ja vikaantuneen lähdön nollavirran mittauksissa näkyvät lyhytkestoiset ja amplitudiltaan suuret piikit. Nämä piikit näkyvät myös terveillä lähdöillä, mikä tekee vikaantuneen lähdön tunnistamisesta vaikeaa. Sammutuskuristin ei näitä lyhyitä ja suuritaajuuksisia virtapiikkejä pysty kompensoimaan, koska suurilla taajuuksilla myös kelan reaktanssi on suuri, ja näin ollen myös kelan tuottama induktiivinen virta on pientä. Kompensointiasteella ei täten ole juuri vaikutusta katkeilevan maasulun virran amplitudiin. (Altonen, Mäkinen, Kauhaniemi & Persson 2003: 2).

Katkeilevan maasulun tunnistaminen vaatii perinteisiin suunnattuihin suojiin verrattuna erilaisia toimintatapoja. Vikaantuneella lähdöllä nollavirran piikki osoittaa vikaantuneella lähdöllä eri suuntaan kuin terveellä lähdöllä, ja lisäksi vikaantuneen lähdön piikin pituus on suurempi kuin terveiden lähtöjen. (Arcteq 2018: 124-125.) Kuvassa 29 on esitetty vikaantuneen ja terveen lähdön nollavirrat ja nollajännite katkeilevan maasulun aikana.



Kuva 29. Nollajännite, terveen ja vikaantuneen lähdön nollavirrat katkeilevan maasulun aikana. (ABB 2018: 428)

4.6 Suunnatun maasulkusuojauksen asettelu

Yleensä jakeluverkon maasulkusuojauksessa käytetään suunnattua maasulkusuojausta. Suuntareleillä toteutettu maasulkusuojaus perustuu johtojen nollavirtojen suuntiin eikä niiden suuruuteen kuten nollavirta releillä. Suuntareleillä aseteltavaa havahtumiskynnystä tarvitaan vain sen takia, etteivät terveessä tilassa esiintyvät nollavirrat ja jännitteet saisi suuntareleitä aiheettomasti toimimaan. Suuntareleet mittaavat nollavirran ja nollajännitteen välistä vaihekulmaa, jonka avulla pystytään päättelemään nollavirran suunta.

Suurena etuna suuntareleiden käytössä on asettelujen riippumattomuus johtojen pituuksista. Tällöin selektiivisyys säilyy myös kytkentätilanteiden muuttuessa, ilman että asetteluja tarvitsee muuttaa. Oikean toiminnan ehtona on, että virtamuuntajasta katsottuna verkon puolella on riittävästi maakapasitanssia releen havahtumiskynnyksen ylittävän nollavirran aikaansaamiseksi (Mörsky 1992: 330-331).

Suuntareleiden toiminnan ehtona on, että vioittuneen lähdön nollavirtareleiden mittaama virta I_0 ja nollajännite U_0 ylittävät asetteluarvot. Vikavirran suunnan määrittämiseksi verrataan summavirtamuuntajan läpi kulkevan virran I_0 ja nollajännitteen $-U_0$ osoittimien välistä kulmaa. Maasulkusuojauksessa käytettävät suojareleiden asetteluarvot riippuvat siitä käytetäänkö verkkoa maasta erotettuna vai sammutettuna. Tämän takia suojareleelle välitetään tieto siitä, onko verkko maasta erotettu vai sammutettu sammutuskelan tilatiedon avulla. Tällöin suojarele kykenee valitsemaan oikean toiminta-alueen maasta erotetulle ja sammutetulle verkolle.

Mikäli suojausvyöhykkeellä esiintyy kosketusjännite, joka saa suuremman arvon kuin 80 V, tulee maasulku kytkeä pois vähintään taulukossa 3 esitetyssä ajassa. Mikäli sallitun maadoitusjännitteen laskennassa käytetään kertoimen k arvona 2 voi maadoitusjännite saada kaksinkertaisen arvon sallittuun kosketusjännitteeseen nähden. Tämä ehtoo määrää suurimman sallitun vian kestoajan suojausalueella. Toiminta-aikaa laskettaessa tulee ottaa huomioon myös katkaisijan toimintaviive.

Maasulkusuojausta suunniteltaessa tarvittavia tietoja ovat verkossa esiintyvät:

- Pienimmät nollavirrat (suuri vikaresistanssi, verkko suppeimmillaan)
- Pienimmät nollajännitteet (suuri vikaresistanssi, verkko laajimmillaan)
- Suurin terveen tilan nollajännite
- Suurin maasulkuvirta
- Maadoitusresistanssit

Lisäksi tulee ottaa huomioon mittamuuntajien muuntosuhteet, peräkkäiset suojausvyöhykkeet ja korvauskytkentätilanteet.

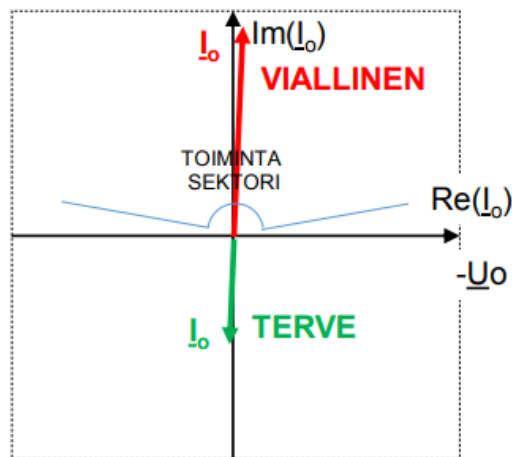
Pienimmät esiintyvät maasulkuvirrat määräävät suojauksen herkkyyden, ja suurimmat virrat määräävät toiminta-aika vaatimuksen yhdessä maadoitusresistanssin kanssa. Pitkä toiminta-aika parantaa mahdollisuuksia valokaarimaasulun itsestään sammumiselle. Käyttämällä kaksiportaista maasulkusuojausta voidaan pienillä maasulkuvirroilla käyttää pitkää toiminta-aikaa antaen maasululle aikaa sammua, ja suurivirtaisilla maasuluilla lyhyttä, jolla maadoitusjännitteiden vaikutusaika jää lyhyeksi.

4.7 Maasta erotettu verkko

Maasta erotetun verkon maasulkuvirta on riippuvainen yhteen kytketyn verkon maakapasitanssista. Viallisen lähdön releen mittaama nollavirta I_0 koostuu terveiden lähtöjen syöttämästä maasulkuvirrasta, sillä viallisen lähdön kehittämä osuus maasulkuvirrasta kulkee summavirtamuuntajan läpi kahteen suuntaan kuvan 23 mukaisesti, jolloin sen osuus mitattavasta virrasta I_0 on nolla. Tällöin releelle asetettava I_0 -ehto tulee olla niin pieni, että myös verkon ollessa suppeimmillaan voidaan havaita suuriresistanssiset viat. Johtolähtöjen alussa sijaitsevat summavirtamuuntajat mittaavat jatkuvasti vaihevirtojen summaa, joka verkon terveessä tilassa on lähes nolla, mutta maasulun aikana virta nousee nollaa suuremmaksi.

Nollajännitteen U_0 alimman arvon määrää verkon terveen tilan nollajännite. Taso-orsirakenteisissa vuorottelemattomissa avojohtoverkoissa terveentilan nollajännite voi olla

useita prosentteja, kun taas pelkkää kaapelia sisältävissä verkoissa nollajännite on hyvin pieni. Verkon tuottaman maasulkuvirran kasvaessa pienenee vikavastuksellisen maasulun aikainen nollajännite. Toisaalta verkon tuottaman maasulkuvirran kasvaessa riittävästi joudutaan usein kosketusjännitevaatimusten vuoksi verkko muuttamaan sammuteuksi, jolloin ongelmaa nollajännitteen vähäisestä noususta vikavastusta sisältävissä maasuluissa ei käytännössä ole. Kuvassa 30 on esitetty maasta erotetun verkon vikaantuneen ja terveen lähdön nollavirtojen osoittimet.



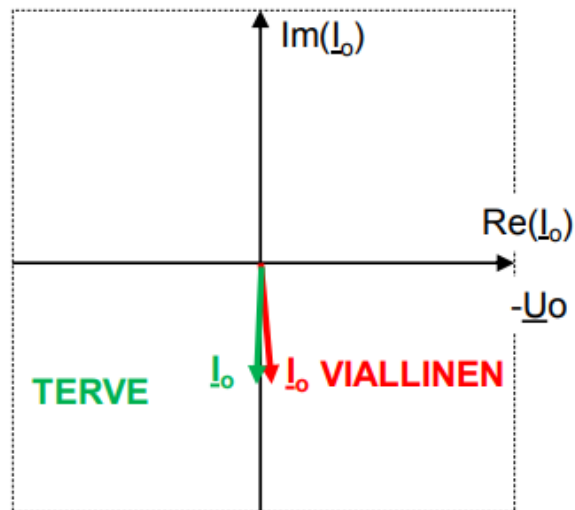
Kuva 30. Maasta erotetun verkon viallisen ja terveen lähdön nollavirran osoittimet (Wahlroos 2017).

Kuvasta havaitaan terveen ja viallisen lähdön nollavirran osoittimien olevan vastakkaisvaiheisia. Tällöin viallinen lähtö on helppo erottaa terveestä. Nollajännitteen $-U_0$ ja nollavirran I_0 välinen kulma on toiminta sektorilla noin $+10^\circ$ ja $+170^\circ$ välillä. Nollajännitteen havahtumisrajana käytetään yleensä $+10\%$. Nollavirran havahtumisraja on yleensä muutama ampeeri. Havahtumisrajojen asettelussa on huomioitava verkon epäsymmetriasta aiheutuvat terveen tilan nollajännite ja nollavirta. Ei ole tarkoituksen mukaista, että kumpikaan näistä ehdoista täytyisi verkon terveessä tilassa, vaan että ehtojen täytyessä on verkossa varmasti vika, toisaalta liian suuret havahtumisrajat aiheuttavat estävät suojausten toimimisen suuriresistanssisissa maasuluissa.

4.8 Kompensoitu verkko

Kun verkko on täysin kompensoitu, kääntyy viallisen lähdön nollavirran osoitin samansuuntaiseksi kuin terveellä lähdöllä. Täysin kompensoidussa verkossa maasulkutilanteessa vikaantuneen lähdön nollavirran mittausta näkee ainoastaan kyseisen lähdön terveitä vaihteita pitkin kohti kiskostoa kulkevan virran, mutta ei lainkaan viallista vaihetta pitkin kohti vikapaikkaa kulkevaa virtaa koska tämä on kompensoitu pois. Vikaantuneen ja terveen lähdön erottaa toisistaan ainoastaan vikavirran resistiivinen komponentti, joka kääntää vikaantuneen lähdön nollavirran osoitinta kohti $-U_0$ osoitinta ja terveen lähdön nollavirran osoitinta $-U_0$ osoittimesta poispäin. Kuvassa 31 on esitetty täysin sammutetun verkon vikaantuneen ja terveen lähdön nollavirtojen osoittimet.

Mikäli jokin johtolähtö ylikompensoitaisiin hajautettuja sammutuskuristimia käyttäen, muuttuisi nollajännitteen ja nollavirran välinen kulma kapasitiivisesta induktiiviseksi aiheuttaen maasulkusuojauksen tarpeettoman toiminnan vian sijaitessa kyseisen lähdön ulkopuolella, mikäli käytetään $I_0 \sin$ -suojausfunktia. Vian aikainen nollajännitteen nousu saisi kuitenkin maasulun varasuojana käytettävän kiskosuojauksen toimimaan aiheuttaen lähtöjen syötön katkaisijan avautumisen.

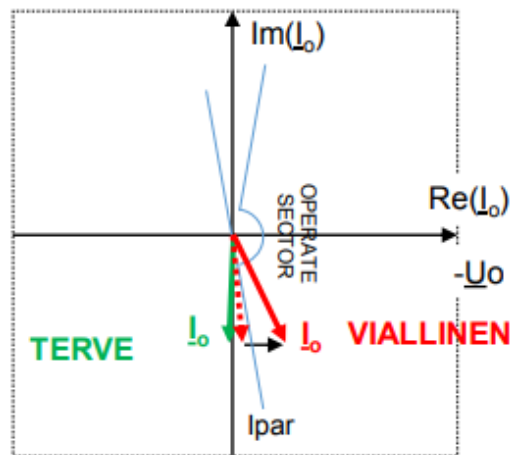


Kuva 31. Sammutetun verkon viallisen ja terveen lähdön nollavirran osoittimet (Wahlroos 2017).

Kuvasta havaitaan, että terveen ja viallisen lähdön nollavirrat ovat lähes samansuuntaisia. Tällöin vikaantuneen ja terveen lähdön erottamiseksi toisistaan vaaditaan nollajännitteen ja nollavirran mittaukselta suurta kulmatarkkuutta. Kompensointilaitteella pystytään kompensoimaan maasulkuvirran kapasitiivinen osuus, mutta ei verkon ja kuristimen pätötehohäviöistä johtuvaa resistiivistä jäännösvirtaa.

Alikompensoidussa verkossa, jossa jäännösmaasulkuvirta vastaa vikaantuneen lähdön kehittämää maasulkuvirtaa, on nollavirrassa ainoastaan resistiivinen komponentti. Tällaisissa tilanteissa suojauksen toiminnan varmistamiseksi on lisävastuksen käyttö välttämätöntä, jotta I_0 saisi riittävän suuren arvon erottuakseen terveen tilan arvosta.

Maasulkuvirran resistiivistä osuutta käytetään hyväksi, kun pyritään erottamaan vikaantunut lähtö terveestä. Koska jäännösvirran suuruus on riippuvainen verkon kytkentätilanteesta ja vikavastuksesta, joudutaan vikavirtaa kasvattamaan käyttämällä sammutuskuristimen rinnalle kykettävää rinnakkaisvastusta. Näin vikavirta saadaan kasvamaan riittävästi selektiivisen suojauksen varmistamiseksi. Rinnakkaisvastus kääntää viallisen lähdön osoitinta kauemmas puhtaasti kapasitiivisesta. Tällöin on mahdollista pienentää suojauksen toiminta alueen kulmaa ja varmistaa, etteivät terveiden lähtöjen nollavirran osoittimet ajaudu toiminta alueelle mittauksen epätarkkuuksista johtuen. Tällöin ei nollavirran mittauksen kulmatarkkuuden tarvitse olla niin tarkka kuin ilman rinnakkaisvastuksen käyttöä. Tämä tekee mahdolliseksi käyttää matalamman tarkkuusluokan mittamuuntajia, jotka ovat yleensä edullisempia verrattuna tarkempiin. Kuvassa 32 on havainnollistettu rinnakkaisvastuksen vaikutus viallisen lähdön nollavirtaan.



Kuva 32. Sammutetun verkon viallisen ja terveen lähdön nollavirran osoittimet rinnakkaisvastuksen ollessa käytössä (Wahlroos 2017).

Kuvasta 32 havaitaan, että rinnakkaisvastuksella vikaantuneen lähdön nollavirta kasvaa hieman, ja lisäksi osoitin kääntyy lähemmäs toimintasektorin keskiosaa. Lisävastuksen käyttö pienentää nollajännitettä, mikä on otettava huomioon releasetteluissa.

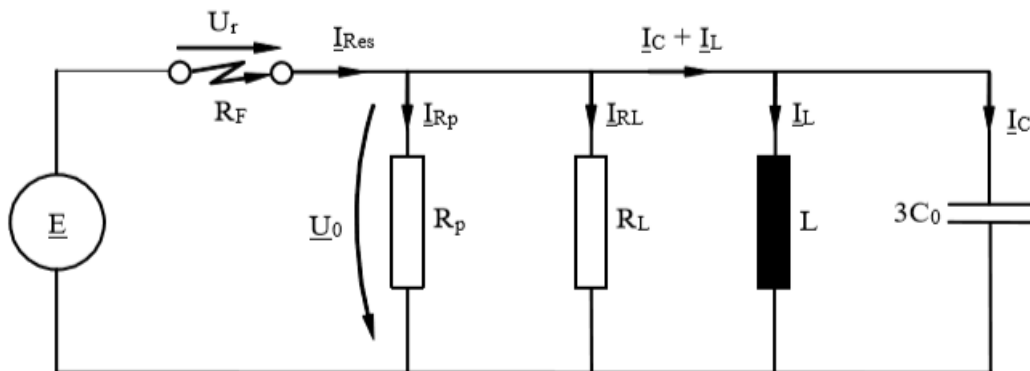
Edellisistä kuvista havaitaan terveen lähdön nollavirran osoittimen olevan aina samanlaisia riippumatta sammutuksen käytöstä. Sammutus vaikuttaa ainoastaan viallisen lähdön nollavirran käyttäytymiseen. Kuvan 24 mukaisesti sammutetun verkon maasulkusuojan asetteluna käytetään toimintasektorilla nollajännitteen $-U_0$ ja nollavirran I_0 välinen kulma noin -80° ja $+80^\circ$ välillä. Nollajännitteen havahtumisrajana käytetään yleensä $+20\%$. Nollavirran havahtumisraja on yleensä pari ampeeria. Sammutuskuristimen käyttö kasvattaa terveen tilan nollajännitettä, jolloin nollajännitteen asetteluarvon tulee olla pienempi kuin maasta erotetussa verkossa.

4.9 Vian poistumisen aiheuttamat jälkivärähtelyilmiöt sammutetussa verkossa

Sammutetussa kaapeliverkossa vian poistumisen jälkeen jäävät verkon nollajännite ja terveiden lähtöjen nollavirrat värähtelemään vaimenevasti. Laajoissa kaapeli- ja sekaverkoissa on havaittu ei-toivottuja symptomialaukaisuja, joissa vian jo poistuttua ja verkon palautuessa normaaliin tilaan on terve johtolähtö lauennut. Tyypillisesti ilmiö on esiinty-

nyt verkoissa, joissa on ollut käytössä hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Hajautettu maasulkuvirran kompensointi saa aikaan sen, että maasulkutilanteessa myös terveellä lähdöllä saattaa esiintyä vikavirtoja, joiden taajuus poikkeaa 50 Hz:stä. Nämä normaalista taajuudesta poikkeavat vikavirrat saattavat aiheuttaa virheellisiä laukaisuja, ellei niiden esiintymistä ole huomioitu suojausta suunniteltaessa.

Suojauksen erotettua vikaantuneen osan verkosta muuttuu jäljelle jäävän verkon kompensointiaste hetkeksi, kunnes keskitetyn kompensointikelan säätäjä on ehtinyt palauttaa kompensointiasteen haluttuun arvoon. Vian poistumisen jälkeen nollajännite jää värähtelemään kompensoinnin ja verkon maakapasitanssien muodostaman rinnakkaisresonanssipiirin resonanssitaajuudella. Kuvassa 33 on esitetty värähtelyilmiön tarkasteluun soveltuva sijaiskytkentä.



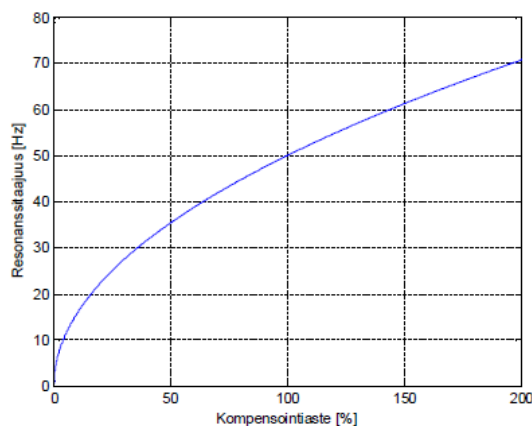
Kuva 33. Sammutetun verkon maasulun jälkivärähtely ilmiön tarkasteluun soveltuva sijaiskytkentä (Nikander & Mäkinen 2017: 18)

Kuvassa R_p edustaa verkon vaimennusta, R_L kuristimen lisävastuksen resistanssi, U_r on vikakohtaan palaava jännite, I_C verkon tuottama kapasitiivinen virta ja I_L on kuristimen tuottama induktiivinen virta. Nollajännitteen värähtelytaajuus vian poistuttua voidaan laskea yhtälöllä

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{3LC_0}}. \quad (13)$$

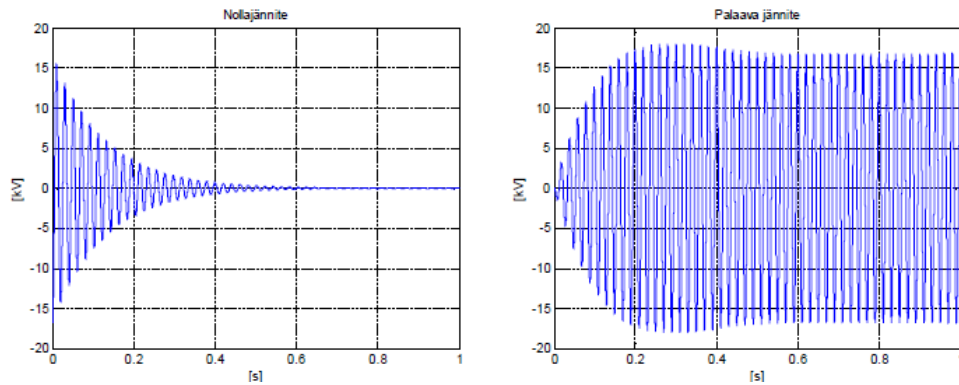
Vaimennuksen vaikutus värähtelytaajuuteen on vähäinen tyypillisillä keskijänniteverkon vaimennuksen arvoilla. Kompensointiasteen ollessa 100 % saa värähtelytaajuus saa värähtelytaajuus f_r arvon 50 Hz (Nikander & Mäkinen 2017:17-18).

Kun viallinen lähtö irrotetaan verkosta, muuttuu verkon kompensointiaste hetkellisesti, koska kuristimen säätäjä ei ehdi säätämään verkon kompensointia aseteltuun arvoon. Riippuen irrotetun verkonosan kapasitiivisen maasulkuvirran suhteesta koko verkon maasulkuvirran suuruuteen muuttuu verkko enemmän tai vähemmän ylikompensoiduksi. Lisäksi muutokseen vaikuttaa, onko irrotetulla lähdöllä hajautettua maasulkuvirran kompensointia. Kuvassa 34 on esitetty yhtälön avulla laskettu nollajännitteen värähtelytaajuus eri kompensointiasteen funktiona.



Kuva 34. Nollajännitteen värähtely taajuus kompensointiasteen funktiona (Nikander & Mäkinen 2017: 19)

Viallisen lähdön irrottua verkosta muuttuu verkko hetkeksi ylikompensoiduksi, jolloin nollajännitteen värähtelytaajuus ylittää 50 Hz. Suojauksen toiminnan kannalta värähtelyilmiössä on oleellista, aiheutuuko siitä terveille lähdöille summavirtaa, jonka suojareleet tulkitsevat pätövirraksi. Tällöin seurauksena voi olla terveiden lähtöjen suojauksien havahtumisia tai jopa virheellisiä laukaisuja. Kaapeloitaessa keskijänniteverkkoa kasvavat maasulkuvirrat huomattavasti nopeammin kuin verkon vaimennus, jolloin jälkivärähtelyjen kesto pidentyy (Nikander & Mäkinen 2017: 23). Kuvassa 35 on esitetty nollajännitteen ja vikapaikkaan palaavan jännitteen käyttäytyminen



Kuva 35. Esimerkki nollajännitteestä ja vikapaikkaan palaavasta jännitteestä maasulkuvian poistuttua (Nikander & Mäkinen 2017: 21).

Suojauksen toiminnan kannalta maasulkusuojien aikahidastus tulisi olla suurempi kuin aika, joka kuluu nollajännitteen vaimenemiseen alle suojien asetteluarvon. Nollajännitteen värähtelyn vaimenemisnopeuteen voidaan vaikuttaa pitämällä kuristimen lisävastus kytkettynä.

5 KOILLIS-SATAKUNNAN SÄHKÖN KESKIJÄNNITEVERKON MAASULKUSUOJAUS

Suojauksen kehittämiseksi on välttämätöntä tuntee suojauksen nykytila ja ongelmat, joita suojauksessa esiintyy tai joiden tulevaisuudessa odotetaan esiintyvän. Suurimpana haasteena suojaukselle tulee olemaan kaapelointiasteen kasvu. Yhtiön verkostostrategian mukaisesti tulevaisuuden tavoiteverkossa keskijänniteverkon kaapelointiaste olisi 30 %. Vuoden 2017 lopussa keskijänniteverkosta 9,1 % oli maakaapelia. Kaapelin määrä verkossa tulee siis kasvamaan runsaasti tulevien vuosien aikana.

Yhtiöllä on 8 keskijänniteverkkoa syöttävää päämuuntajaa, joista kuudella on käytössä keskitetty maasulkuvirran sammutus, Ritarin sähköasemalla osittain sammutettu verkko ja Killinkosken sähköasemalla maasta erotettu verkko. Keskitetyn maasulkuvirran sammutuksen yhteydessä on käytössä maasulkuvirran resistiivistä osuutta kasvattava lisävastus, joka tuottaa suorassa maasulussa nollajännitteen noustessa vaihejännitteen suuruiseksi noin 2,1 A virran. Taulukkoon 3 on listattu verkon tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta sähköasemittain.

Taulukko 3. Maasulkuvirrat ja sammutuskuristimet sähköasemittain.

| Asema | $I_c(A)$ | $I_{cs}(A)$ | $I_r(A)$ | $I_{kok}(A)$ | keskitetty (A) | hajautettu (A) |
|----------|----------|-------------|----------|--------------|----------------|----------------|
| Inha | 26,4 | 1,3 | 3,7 | 3,9 | 87 | 3,5 |
| Ähtäri | 104,3 | 5,2 | 3,7 | 6,4 | 211 | 17 |
| Virrat | 132,2 | 6,6 | 3,7 | 7,6 | 211 | 8,5 |
| Heinäaho | 72,6 | 3,6 | 3,7 | 5,2 | 87 | 0 |
| Killi | 11,5 | 11,5 | 0 | 11,5 | 0 | 0 |
| Ritari | 11,1 | 7,6 | 0 | 7,6 | 0 | 3,5 |
| Toopakka | 39,1 | 2 | 3,7 | 4,2 | 105 | 8,5 |

Taulukossa I_c on verkon tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta, I_{cs} on kapasitiivisen maasulkuvirran kompensoimatta jäävä osuus käytettäessä verkkoa 5 % alikompensoituna, I_r on lisävastuksen tuottama resistiivinen maasulkuvirta, I_{kok} on maasulkuvirran kompensoimattoman osuuden ja lisävastuksen tuottaman resistiivisen osuuden neliöllinen summa, sarakekeessa keskitetty on listattu keskitetyn sammutuskuristimen koko ja sarakekeessa hajautettu on listattu kaikki kyseisen sähköaseman verkkoon kytketyt hajautetut

maasulkuvirran kompensointilaitteet. Taulukosta havaitaan maasulkuvirran olevan suurin Killinkosken sähköasemalla, mikä johtuu sammutuksen puuttumisesta. Lisäksi Heinäahon sähköasemalla alkaa sammutuslaitteen kapasiteetti tulla vastaan kaapeloinnin jatkuessa. Mikäli sammutuslaitteiston kapasiteettia ei kasvateta, muuttuu verkko entistä enemmän alikompensoituksi kaapelointiasteen kasvaessa. Lisäksi korvauskytkentätilanteissa sähköaseman syöttämän verkon pituuden kasvaessa ei sammutuslaitteistolla ole välttämättä riittävästi kapasiteettia ylläpitämään haluttu kompensointiaste. Tällaisissa tilanteissa verkon maasulkuvirta kasvaa ja saattaa aiheuttaa sallittujen kosketusjännitteiden ylittymisen. Tällöin kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi täytyy joko lyhentää maasulkusuojien toiminta-aikoja tai parantaa kosketeltavissa olevien osien maadoituksia.

Suojausaikojen lyhentäminen heikentää kuitenkin valokaarimaasulun itsestään sammumisen mahdollisuutta lisäten turhia keskeytyksiä. Maadoitusresistanssin pienentäminen voi joissain kohteissa olla hyvin haasteellista johtuen maaperän suuresta resistiivisyydestä.

Suunniteltaessa maasulkusuojausta täytyy varmistua siitä, että suojaus on toimiva kaikissa verkon kytkentätilanteissa. Tarkasteluun riittää tällöin tapaukset, joissa verkko on laajimmillaan ja suppeimmillaan.

5.1 Kosketusjännitevaatimusten täytyminen nykyisessä verkossa

Nykyisellään maasulkusuojauksen aikahidastuksena sammutetussa verkossa on käytetty 1,35 s ja maasta erotetussa verkossa 0,35 s. Katkaisijan toiminta-aikana laskelmissa on käytetty 0,08 s. Tällöin sammutetussa verkossa maasulkuvian kestoajaksi saadaan 1,43 s. Maastokatkaisijoita sisältävillä lähdöillä on suojauksen selektiivisyyden saavuttamiseksi käytössä 0,2 s-0,25 s suurempi aikahidastus kuin muilla lähdöillä. Kosketusjännitevaatimusten täytyminen on laskettu käyttämällä verkkotietojärjestelmästä saatua maasulkuvirran arvoa 0Ω vikaresistanssilla. Kaikilla asemilla, joilla on käytössä keskitetty maasulkuvirran kompensointi, on käytössä myös kompensointikuristimen lisävastus.

Lisäksi on laskettu kosketusjännitevaatimusten täyttyminen käytettäessä 0,7 s aikahidastusta maasulkusuojiin asetelluissa. Seuraavissa alakappaleissa olevissa taulukoissa on esitetty lähdöittäin muuntamoiden lukumäärä, joissa SFS-6001 mukaiset kosketusjännitevaatimukset eivät täyty käytettäessä nykyistä 1,35 s maasulkusuojausajan aikahidastusta. Lisäksi on laskettu kosketusjännitevaatimusten täyttyminen käytettäessä lyhyempää 0,7 s aikahidastusta.

5.1.1 Heinäahon sähköasema

Heinäahon sähköasemalla on 6 keskijännitelähtöä ja lisäksi lähdöllä Autio on käytössä maastokatkaisija, joka luo oman suojausalueen Luokkalammen lähdölle. Asemalla on käytössä keskitetty maasulkuvirran kompensointi 87 A kompensointikelalla. Verkko tuottaa nykyisellään maasulkuvirtaa 79 A. Verkkotietojärjestelmän mukainen jäännösmaasulkuvirran arvo on 4,6 A.

Taulukko 4. Heinäahon sähköaseman muuntamoiden maadoitusjännite vaatimusten täyttyminen nykyisellä maasulkusuojausajan aikahidastuksella 1,35 s ja uudella 0,7 s aikahidastuksella. Vian kestoja laskettaessa katkaisijan toiminta-aikana on käytetty 0,08 s.

| Heinäaho I _{ef} =4,6A | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|-------------------|--|----------------|-------------------|--|
| Lähtö | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} |
| Kihniö | 1,43 | 210 | 3/90 | 0,78 | 260 | 1/90 |
| Kurjenkylä | 1,43 | 210 | 1/42 | 0,78 | 260 | 0/42 |
| Äijänneva | 1,43 | 210 | 1/50 | 0,78 | 260 | 1/50 |
| Ritari | 1,43 | 210 | 3/65 | 0,78 | 260 | 2/65 |
| Virrat | 1,43 | 210 | 0/9 | 1,43 | 210 | 0/9 |
| Autio | 1,63 | 204 | 0/17 | 0,98 | 240 | 0/17 |
| Luokka- lampi | 1,38 | 212 | 0/11 | 0,78 | 260 | 0/11 |
| yhteensä | | | 8/284 | | | 4/284 |

Heinäahon sähköaseman syöttämistä muuntamoista alle 3 % kosketusjännitevaatimukset eivät nykyisellään täyty. Lyhennetyllä aikahidastuksella hieman alle 1,5 % muuntamoista ei täyty kosketusjännitevaatimuksia.

5.1.2 Virtain sähköasema

Virtain sähköasemalla on 6 keskijännitelähtöä ja lisäksi lähdön Kotala takana on jakoasema, josta on 5 keskijännitelähtöä, jotka muodostavat oman suojausalueensa. Asemalla on käytössä keskitetty maasulkuvirran kompensointi 211 A kompensointikelalla ja lisäksi hajautetut maasulkuvirran kompensointikelat Kotalan jakoasemalla 5 A ja Vaskiveden lähdöllä 3,5 A. Yhteensä maasulkuvirran sammutuskapasiteettia on 219,5 A. Verkko tuottaa nykyisellään maasulkuvirtaa 135 A. Verkkotietojärjestelmän mukainen jäännösmaasulkuvirran arvo on 7,6 A.

Taulukko 5. Virtain sähköaseman muuntamoiden maadoitusjännite vaatimusten täytyminen nykyisellä maasulkusuojauksen aikahidastuksella 1,35 s ja uudella 0,7 s aikahidastuksella. Vian kestoa laskettaessa katkaisijan toiminta-aikana on käytetty 0,08 s.

| Lähtö | Virrat I _{ef} =7,6A | | | | | |
|--------------------|------------------------------|-------------------|--|----------------|-------------------|--|
| | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} |
| Tapiola | 1,43 | 210 | 1/21 | 0,78 | 260 | 1/21 |
| Ahjola | 1,43 | 210 | 1/6 | 0,78 | 260 | 1/6 |
| Vaskivesi | 1,43 | 210 | 0/11 | 0,78 | 260 | 0/11 |
| Purula | 1,43 | 210 | 1/12 | 0,78 | 260 | 1/12 |
| Kotala | 1,78 | 196 | 0/30 | 0,98 | 240 | 0/30 |
| <i>Pihlajavesi</i> | 1,43 | 210 | 1/20 | 0,78 | 260 | 0/20 |
| <i>Itämeri</i> | 1,43 | 210 | 3/16 | 0,78 | 260 | 2/16 |
| <i>Korhonen</i> | 1,43 | 210 | 0/7 | 0,78 | 260 | 0/7 |
| <i>Piili</i> | 1,43 | 210 | 2/9 | 0,78 | 260 | 1/9 |
| <i>Killinkoski</i> | 1,43 | 210 | 2/9 | 0,78 | 260 | 2/9 |
| Killi | 1,43 | 210 | 1/19 | 0,78 | 260 | 1/19 |
| yhteensä | | | 13/160 | | | 9/160 |

Virtain sähköaseman syöttämistä muuntamoista noin 8 %:lla kosketusjännitevaatimukset eivät nykyisellään täyty. Lyhennetyllä aikahidastuksella hieman alle 6 % muuntamoista ei täytä kosketusjännitevaatimuksia.

5.1.3 Toopakan sähköasema

Toopakan sähköasemalla on 6 keskijännitelähtöä, ja asemalla on käytössä keskitetty maasulkuvirran kompensointi 105 A kompensointikelalla ja lisäksi 2 hajautettua maasulkuvirran kompensointikelaa kooltaan 5 A ja 3,5 A. Yhteensä maasulkuvirran sammutuskapasiteettia on 113,5 A. Verkko tuottaa nykyisellään maasulkuvirtaa 31 A. Verkkotietojärjestelmän mukainen jäännösmaasulkuvirran arvo on 3 A.

Taulukko 6. Toopakan sähköaseman muuntamoiden maadoitusjännitevaatimusten täyttyminen nykyisellä maasulkusuojauksen aikahidastuksella 1,35 s ja uudella 0,7 s aikahidastuksella. Vian kestoja laskettaessa katkaisijan toiminta- aikana on käytetty 0,08 s.

| | Toopakka I _{ef} =3A | | | | | |
|-----------------|------------------------------|-------------------|--|----------------|-------------------|--|
| Lähtö | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} |
| Kitula | 1,43 | 210 | 0/14 | 0,78 | 260 | 0/14 |
| Virtala | 1,43 | 210 | 0/28 | 0,78 | 260 | 0/28 |
| Inha | 1,43 | 210 | 0/41 | 0,78 | 260 | 0/41 |
| Töysä KK | 1,43 | 210 | 0/23 | 0,78 | 260 | 0/23 |
| Pollari | 1,43 | 210 | 1/30 | 0,78 | 260 | 0/30 |
| Ähtäri | 1,43 | 210 | 1/14 | 0,78 | 260 | 1/14 |
| yhteensä | | | 2/150 | | | 1/150 |

Toopakan sähköaseman syöttämistä muuntamoista kahdella kosketusjännitevaatimukset eivät nykyisellään täyty. Lyhennetyllä aikahidastuksella toisella näistä saadaan asia kuntoon.

5.1.4 Inhan sähköasema

Inhan sähköasemalla on 6 keskijännitelähtöä ja asemalla on käytössä keskitetty maasulkuvirran kompensointi 87 A kompensointikelalla ja lisäksi hajautettu maasulkuvirran kompensointikela kooltaan 3,5 A. Yhteensä maasulkuvirran sammutuskapasiteettia on 90,5 A. Verkko tuottaa nykyisellään maasulkuvirtaa 28 A. Verkkotietojärjestelmän mukainen jäännösmaasulkuvirran arvo on 3,1 A.

Taulukko 7. Inhan sähköaseman muuntamoiden maadoitusjännitevaatimusten täyttyminen nykyisellä maasulkusuojauksen aikahidastuksella 1,35 s ja uudella 0,7 s aikahidastuksella. Vian kestoa laskettaessa katkaisijan toiminta-aikana on käytetty 0,08 s.

| | Inha I _{ef} =3,1A | | | | | |
|------------------|----------------------------|-------------------|--|----------------|-------------------|--|
| Lähtö | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} |
| Myllymäki | 1,43 | 210 | 0/14 | 0,78 | 260 | 0/14 |
| Pihlajavesi | 1,43 | 210 | 1/15 | 0,78 | 260 | 1/15 |
| Killi | 1,43 | 210 | 3/20 | 0,78 | 260 | 3/20 |
| Tuo- marniemi | 1,43 | 210 | 0/7 | 0,78 | 260 | 0/7 |
| Ähtäri | 1,43 | 210 | 0/7 | 0,78 | 260 | 0/7 |
| Töysä | 1,43 | 210 | 0/8 | 0,78 | 260 | 0/8 |
| yhteensä | | | 4/71 | | | 4/71 |

Inhan sähköaseman syöttämistä muuntamoista noin 6 %:lla kosketusjännitevaatimukset eivät nykyisellään täyty. Lyhennetyllä aikahidastuksella ei saada vähennettyä ongelmallisten muuntamoiden lukumäärää.

5.1.5 Ähtärin sähköasema

Ähtärin sähköasemalla on 6 keskijännitelähtöä, ja asemalla on käytössä keskitetty maasulkuvirran kompensointi 211 A kompensointikelalla ja lisäksi kolme hajautettua maasulkuvirran kompensointikelaa yhteensä 13,5 A. Yhteensä maasulkuvirran sammutuskapasiteettia on 224,5 A. Verkko tuottaa nykyisellään maasulkuvirtaa 104 A. Verkkotietojärjestelmän mukainen jäännösmaasulkuvirran arvo on 6,3 A.

Taulukko 8. Ähtärin sähköaseman muuntamoiden maadoitusjännitevaatimusten täyttyminen nykyisellä maasulkusuojausajan aikahidastuksella 1,35 s ja uudella 0,7 s aikahidastuksella. Vian kestoa laskettaessa katkaisijan toiminta-aikana on käytetty 0,08s

| | Ähtäri I _{ef} =6,3A | | | | | |
|-------------------|------------------------------|-------------------|---|----------------|-------------------|---|
| Lähtö | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} |
| Tankki | 1,43 | 210 | 0/12 | 0,78 | 260 | 0/12 |
| Keskusta | 1,43 | 210 | 0/7 | 0,78 | 260 | 0/7 |
| Ähtäri pohjoinen | 1,43 | 210 | 0/12 | 0,78 | 260 | 0/12 |
| Kitula | 1,43 | 210 | 3/50 | 0,78 | 260 | 1/50 |
| Ähtäri etelä | 1,43 | 210 | 0/30 | 0,78 | 260 | 0/30 |
| Myllymäki | 1,63 | 200 | 0/14 | 0,98 | 240 | 0/14 |
| <i>Myllymäki</i> | 1,38 | 212 | 1/31 | 0,78 | 260 | 0/31 |
| <i>Niemiskylä</i> | 1,38 | 212 | 3/12 | 0,78 | 260 | 1/12 |
| Töysä | 1,38 | 212 | 0/2 | 0,78 | 260 | 0/2 |
| yhteensä | | | 7/170 | | | 2/170 |

Ähtärin sähköaseman syöttämistä muuntamoista noin 4 %:lla kosketusjännite vaatimukset eivät nykyisellään täyty. Lyhennetyllä aikahidastuksella noin 1 % muuntamoista kosketusjännitevaatimukset eivät täyty.

5.1.6 Ritarin sähköasema

Ritarin sähköasemalla on 4 keskijännitelähtöä eikä käytössä ole nykyisellään maasulkuvirran keskitettyä kompensointia. Käytössä on yksi hajautettu kompensointikela kooltaan 3,5 A. Verkko tuottaa nykyisellään maasulkuvirtaa 14 A. Verkkotietojärjestelmän mukainen jäännösmaasulkuvirran arvo on 9 A.

Taulukko 9. Ritarin sähköaseman muuntamoiden maadoitusjännitevaatimusten täyttyminen nykyisellä maasulkusuojauksen aikahidastuksella 1,35 s ja uudella 0,7 s aikahidastuksella. Vian kestoa laskettaessa katkaisijan toiminta-aikana on käytetty 0,08 s.

| | Ritari I _{ef} =9A | | | | | |
|-----------------|----------------------------|-------------------|---|----------------|-------------------|---|
| Lähtö | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} | Vian kesto (s) | 2*U _{tp} | muuntamot U _e >2*U _{tp} |
| Killinkoski | 1,43 | 210 | 2/17 | 0,78 | 260 | 0/17 |
| Konttinen | 1,43 | 210 | 8/50 | 0,78 | 260 | 3/50 |
| Sulkava | 1,43 | 210 | 12/36 | 0,78 | 260 | 6/36 |
| Heinäaho | 1,43 | 210 | 1/21 | 0,78 | 260 | 1/21 |
| yhteensä | | | 23/124 | | | 10/124 |

Ritarin sähköaseman syöttämistä muuntamoista noin 19 %:lla kosketusjännitevaatimukset eivät nykyisellään täyty. Lyhennetyllä aikahidastuksella noin 8 %:lla muuntamoista kosketusjännitevaatimukset eivät täyty.

5.1.7 Killinkosken sähköasema

Killinkosken sähköasemalla on 6 keskijännitelähtöä eikä käytössä ole nykyisellään maasulkuvirran keskitettyä kompensointia. Käytössä on yksi hajautettu kompensointikela kooltaan 3,5 A. Verkko tuottaa nykyisellään maasulkuvirtaa 14 A. Verkkotietojärjestelmän mukainen jäännösmaasulkuvirran arvo on 9 A.

Taulukko 10. Killinkosken sähköaseman muuntamoiden maadoitusjännitevaatimusten täyttyminen nykyisellä maasulkusuojauksen aikahidastuksella 1,35 s ja uudella 0,7 s aikahidastuksella. Vian kestoja laskettaessa katkaisijan toiminta-aikana on käytetty 0,08 s.

| | Killi Ief=11,3A | | | | | |
|-----------------|-----------------|-------|--------------------|----------------|-------|--------------------|
| Lähtö | Vian kesto (s) | 2*Utp | muuntamot Ue>2*Utp | Vian kesto (s) | 2*Utp | muuntamot Ue>2*Utp |
| Inka | 1,48 | 208 | 2/2 | 0,78 | 260 | 2/2 |
| Virrat | 1,48 | 208 | 1/9 | 0,78 | 260 | 1/9 |
| Ähtäri | 1,43 | 210 | 7/35 | 0,78 | 260 | 4/35 |
| Alavus | 1,43 | 210 | 11/25 | 0,78 | 260 | 7/25 |
| yhteensä | | | 21/81 | | | 14/81 |

Ritarin sähköaseman syöttämistä muuntamoista noin 19 %:lla kosketusjännitevaatimukset eivät nykyisellään täyty. Lyhennetyllä aikahidastuksella noin 8 %:lla muuntamoista kosketusjännitevaatimukset eivät täyty.

5.1.8 Yhteenveto kosketusjännitevaatimusten täyttymisestä nykyisessä verkossa

Nykyisessä verkossa yhteensä 78 muuntamolla kosketusjännitevaatimukset eivät täyty käytettäessä maasulkusuojien nykyistä aikahidastusta. Aikahidastuksen lyhentäminen 0,7 s:iin parantaa tilannetta merkittävästi, mutta edelleenkin kaikilta osin vaatimukset eivät täyty. Tällöin yhteensä 44 muuntamolla kosketusjännitevaatimukset eivät täyty.

Laskelmia tavoiteverkon osalta ei nykyistä kompensointiasetusta käytettäessä tehty, sillä oli selvää, että tällöin muuntamoita, joilla kosketusjännitevaatimukset eivät täytyisi, olisi vielä huomattavasti enemmän kuin nyt johtuen tavoiteverkon huomattavasti suuremmasta jäännösmaasulkuvirrasta.

5.2 Kosketusjännitevaatimusten täyttyminen tavoiteverkossa

Kuten edellä olevista taulukoista havaitaan, eivät kosketusjännitevaatimukset kaikilta osin täyty nykyisellä verkolla edes lyhennetyllä aikahidastuksella. Aikahidastuksen lyhentäminen 0,7 sekuntia lyhyemmäksi ei ole suotavaa, sillä lyhyemmillä aikahidastuksilla valokaarimaasulkujen itsestään sammumisen todennäköisyys pienenee, ja mahdollisuus jälkivärähtelyilmiön aiheuttamiin ongelmiin suojauksen toiminnassa kasvaa. Siirryttäessä kohti tavoiteverkkoa on kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi jäännösmaasulkuvirtaa pienennettävä.

Arvioidaan, että tavoiteverkossa jokaisen sähköaseman keskijänniteverkon kaapelipituus kasvaa 45 km nykyisestä. Tämä tarkoittaa noin 110 A:n lisäystä maasulkuvirtatasoihin. Maasta erotetuilla Killinkosken ja Ritarin sähköasemilla tämä edellyttää sammutuksen käyttöönottoa. Lisäksi lähes kaikilla sähköasemilla lukuun ottamatta asemia Inha ja Virrat on tarpeen kasvattaa maasulkuvirran kompensointikapasiteettia.

Nykyisin käytössä olevan kompensointiasteen käyttö tavoiteverkossa ei mahdollista kosketusjännitevaatimusten täyttämistä jäännösmaasulkuvirran kasvaessa samassa suhteessa verkon tuottaman maasulkuvirran kanssa. Maviko Oy suosittelee, että nykyisesti 5 % alikompensoidusta verkosta siirryttäisiin käyttämään -2 A:n sivuunviritystä. Tällöin jäännösmaasulkuvirta ei kasvaisi verkon maasulkuvirtatasojen kasvaessa. Laajoissa verkoissa tämä tarkoittaa, että siirrytään lähemmäs resonanssipistettä, mikä aiheuttaa terveen tilan nollajännitteen kohoamista. Toisaalta kaapelointiasteen kasvu vastaavasti laskee terveen tilan nollajännitettä, jolloin muutos ei ole kovinkaan merkittävä. (Autio 2019)

Myös muissa verkkoyhtiöissä on päädytty käyttämään kuristimen kiinteää sivuunviritystä. Elenialla käytössä on -5 A:n sivuunviritys. Elenialla on myös käytössä runsaasti lähdoille sijoitettuja hajautettuja kuristimia, joilla pyritään pitkien kaapelilähtöjen yhteydessä vähentämään maasulkuvirran resistiivisen komponentin kasvua.

Siirtyminen -2 A kompensointiasteeseen pienentää jäännösmaasulkuvirtaa kaikilla Koillis-Satakunnan Sähkön sähköasemilla. Jäännösmaasulkuvirran pienenemisellä on myös

positiivinen vaikutus valokaarimaasulkujen itsestään sammumiselle ja siten myös jälleenytkentöjen määrään. Laskettaessa jäännösmaasulkuvirran I_{ef} suuruutta on resistiivisenä komponenttina huomioitu kuristimen lisävastuksen tuottama virta 2,1 A ja verkon ja kuristimen resistiivisten häviöiden olevan 2 % kapasitiivisesta virrasta. Taulukossa 11 on esitetty, kuinka maasulkusuojien 0,7 s aikahidastuksella ja kompensointikuristimen 2 A sivuunvirityksellä kosketusjännitevaatimukset muuntamoilla täyttyvät.

Taulukko 11. Kosketusjännitevaatimusten täyttyminen muuntamoilla nykyisessä- ja tavoiteverkossa käytettäessä -2 A:n sammutuskuristimen sivuun viritystä.

| | Nykyinen verkko | | Tavoite verkko | |
|-----------------|-----------------|------------------------|----------------|------------------------|
| Asema | I_{ef} | $U_e > 2 \cdot U_{tp}$ | I_{ef} | $U_e > 2 \cdot U_{tp}$ |
| Heinäaho | 4,6 | 4/285 | 6,2 | 9/285 |
| Virrat | 5 | 6/160 | 7,1 | 8/160 |
| Toopakka | 3,2 | 1/150 | 5,1 | 2/150 |
| Ritari | 3 | 0/124 | 4,9 | 0/124 |
| Inha | 3,2 | 4/133 | 5,1 | 4/133 |
| Ähtäri | 4,4 | 2/160 | 6,4 | 2/160 |
| Killi | 3 | 3/81 | 4,9 | 5/81 |
| yhteensä | | 20/1093 | | 30/1093 |

Nykyisessä verkossa muuntamoita, joilla kosketusjännitevaatimukset eivät nykyisellään täyty on edelleen 19 kpl. Tavoiteverkossa muuntamoita, joilla kosketusjännitevaatimukset eivät tavoiteverkossa täyty, on 30 kpl. Tavoiteverkossa jäännösmaasulkuvirran kasvu johtuu siitä, että suuremmassa verkossa kasvavat myös verkon ja kuristinten resistiiviset häviöt. Näiden häviöiden kasvaessa voi olla aiheellista pienentää kuristimen lisävastuksen tuottamaa virtaa kosketusjännitevaatimusten täyttymisen parantamiseksi. Toisaalta tällöin jälkivärähtelyilmiön vaimeneminen hidastuu.

Kosketusjännitevaatimusten täyttäminen edellyttää, että maadoitusjännite on alle 260 V, kun vian kesto on 0,78 s. Kun tiedetään jäännösmaasulkuvirran I_{ef} ja 0,78s viankestolla sallitun suurimman maadoitusjännitteen U_e suuruus voidaan Ohmin lain avulla laskea kuinka suuri maadoitusresistanssi R_m voi suurimmillaan olla

$$R_m \leq \frac{U_e}{I_{ef}}. \quad (14)$$

Taulukossa 12 on esitetty suurimmat sallitut maadoitusjännitteet sähköasemittain nykyisen verkon ja tavoiteverkon jäännösmaasulkuvirralla.

Taulukko 12. Suurimmat sallitut maadoitusresistanssit sähköasemittain nykyisen ja tavoiteverkon jäännösmaasulkuvirran suuruudella ja 260 V maadoitusjännitteellä.

| | <i>Suurin sallittu maadoitusresistanssi (Ω)</i> | |
|----------|---|---------------|
| | nykyinen verkko | tavoiteverkko |
| Heinäaho | 56,5 | 41,9 |
| Virrat | 52 | 36,6 |
| Toopakka | 81,3 | 51 |
| Ritari | 86,7 | 53 |
| Killi | 86,7 | 53 |
| Ähtäri | 59 | 40,6 |
| Inha | 81,3 | 51 |

Muuntamot, joiden maadoitusresistanssi ylittää taulukossa 12 esitetyt maadoitusresistanssin suuruuden eivät täytä kosketusjännitevaatimuksia. Taulukossa 13 on esitetty sähköasemittain muuntamot, joiden maadoitusresistanssit ylittävät taulukossa 12 esitetyt arvot.

Taulukko 13. Muuntamot, joiden maadoitusresistanssi on liian suuri kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi nykyisessä verkossa.

| Heinäaho | | $R_m (\Omega)$ |
|-----------------|---------------|----------------------------------|
| 7028 | Nuttura | 147 |
| 4155 | Letonmäki | 117 |
| 5046 | Ylä-Tulijoki | 102 |
| 95022 | Pyymäki | 96 |
| Virrat | | $R_m (\Omega)$ |
| 3110 | Puttosjärvi | 55 |
| 3053 | Puttosjarju | 239 |
| 92021 | Leponiemi | 53 |
| 2036 | Piili | 500 |
| 2117 | Metsästysmaja | 135 |
| 3099 | Kuusela | 55,2 |
| Toopakka | | $R_m (\Omega)$ |
| 8095 | Hiipakka | 261 |
| Inha | | $R_m (\Omega)$ |
| 6234 | Hiippu | 87 |
| 6203 | Torakka | 773 |
| 2109 | Lehtisalo | 132 |
| 6180 | Niinilampi | 113,2 |
| Ähtäri | | $R_m (\Omega)$ |
| 6143 | Takala | 90 |
| 6220 | Hokkasen saha | 91 |
| Killi | | $R_m (\Omega)$ |
| 5031 | Ijäs | 310 |
| 5053 | Alitalo | 154 |
| 5039 | Seppälä | 94 |

Tavoiteverkossa taulukossa 13 esitettyjen muuntamoiden lisäksi myös seuraavat muuntamot eivät täytä kosketusjännitevaatimuksia, mikä johtuu tavoiteverkon suuremmasta jäännösmaasulkuvirrasta.

Taulukko 14. Muuntamot, joiden maadoitusresistanssi on liian suuri kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi tavoiteverkossa taulukossa 13 esitettyjen muuntamoiden lisäksi.

| Heinäaho | | $R_m (\Omega)$ |
|----------|--------------|----------------|
| 7028 | Nuttura | 147 |
| 4155 | Letonmäki | 117 |
| 5046 | Ylä-Tulijoki | 102 |
| 95022 | Pyymäki | 96 |
| Virrat | | $R_m (\Omega)$ |
| 2143 | Kitusjärvi | 38 |
| 2083 | Riitamäki | 50 |
| Ritari | | $R_m (\Omega)$ |
| 5211 | Nurmi | 49 |
| 5212 | Riihineva | 48 |
| Killi | | $R_m (\Omega)$ |
| 6095 | Sainio | 77 |
| 6068 | Pihtiniemi | 62 |

Verkossa on useita muuntamoita, joiden maadoitusvastukset saavat poikkeuksellisen suuria arvoja tehden kosketusjännitevaatimusten täyttämisestä erittäin vaikeaa. Näiden muuntamoiden osalta on hyvä selvittää, olisiko mahdollista soveltaa $U_e \leq 4 \cdot U_{tp}$. Kappaleessa 4.2 on esitetty SFS-6001 standardin vaatimukset $U_e \leq 4 \cdot U_{tp}$ käyttämiselle.

Niillä muuntamoilla, joilla $U_e \leq 4 \cdot U_{tp}$ ei voida käyttää, jää ainoaksi keinoksi kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi maadoitusten parantaminen lisäämällä maadoituselektrodeja, tai yhdistämällä muuntamoiden maadoituksia keskenään.

5.3 Auguste-pilottiprojekti

Pilottiprojektin tavoitteena on toteuttaa Virrat Kotala johtolähdön 3 haarajohdon erotus vikatilanteessa automaattisesti. Haarajohtoihin on tarkoitus asentaa Auguste-kuormanerottimet, jotka varustetaan virtamuuntajilla ja summavirtamuuntajalla. Tällöin kuormerotin pystyy havaitsemaan takanaan olevan oiko- tai maasulun ja erottamaan viallisen

haarajohdon sähköaseman aikajälleenkytkennän jälkeen, ja lähdön katkaisija kytkee jännitteen seuraavalla jälleenkytkennällä takaisin verkon muihin osiin. Maasulkusuojaus ei ole suunnattu, mutta se saadaan sopivaa asetteluarvoa käyttäen toimimaan suunnatun suojan tavoin käyttäen hyväksi haarajohdon tuottaman maasulkuvirran pienuutta verrattuna muun verkon tuottamaan maasulkuvirtaan. Haarajohdon automaattinen erotus toimii, mikäli johtolähdön maasulkusuojaus on suorittanut epäonnistuneesti pikajälleenkytkennän ja aikajälleenkytkennän eikä vika ole poistunut. Tällöin mikäli haarajohdolta mitattu I_o ylittää asetteluarvon, suoritetaan haarajohdon automaattinen erotus. Vian sijaitessa haarajohdolla koko taustaverkko syöttää maasulkuvirtaa vikapaikkaan. Tällöin kuormaerotin havaitsee vian olevan haarajohdolla ja erottaa haarajohdon. Laite lähettää lisäksi viestin käytönvalvontajärjestelmään irrotettuaan vikapaikan verkosta, jolloin jännite voidaan palauttaa lähdölle.

Oikosulkuvian laite havaitsee olevan takanaan, mikäli virta ylittää laitteelle asetetut arvot. Normaalitilan kuormitusvirrat haarajohdolla ovat niin pienet, että myös suuriresistanssiset oikosulkuviat voidaan luottavasti havaita ja saada silti riittävä marginaali normaalin kuormitusvirran välille. Alla olevaan taulukkoon on listattu tiedot haaroista, joihin kuormanerotin on tarkoitus asentaa.

Taulukko 15. Haarojen pituudet, tuottamat maasulkuvirrat I_{eh} ja suurimmat kuormitusvirrat I_h .

| Haara | pituus (km) | maasulkuvirta I_{eh} (A) | kuormitusvirta I_h (A) |
|-----------------|-------------|----------------------------|--------------------------|
| Niemikylä haara | 5 | 0,34 | 7,3 |
| Patoperä haara | 3,8 | 0,25 | 5,2 |
| Rytömäki haara | 3,6 | 0,24 | 3,3 |

Vian voidaan katsoa sijaitsevan haarajohdolla, mikäli kyseiseltä haarajohdolta mitattu maasulkuvirta ylittää haarajohdon itse tuottaman maasulkuvirran. Virtain sähköaseman keskijänniteverkon maasulkuvirta on vikaresistanssittomassa maasulussa käytettäessä sammutusta 7,1 A. Maasulkuvirran suuruus vikaresistanssia sisältävissä maasuluissa saadaan laskettua yhtälöllä

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e}{U} R_f\right)^2}}, \quad (15)$$

missä I_{ef} on vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta. Tällöin maasulkuvirraksi 10 k Ω :n vikaresistanssilla saadaan 1,14 A. Käyttämällä asetteluissa 1 A I_o ehtoa toimii vikaantuneen haaran automaattinen erotus hieman yli 10 k Ω :n vikaresistanssiin asti. Suuremmalle herkkyydelle ei ole tarvetta, sillä johtolähdön maasulkusuojauskeskityksen ensimmäinen porraskorjaus on aseteltu havahtumaan myös 1 A I_o arvolla.

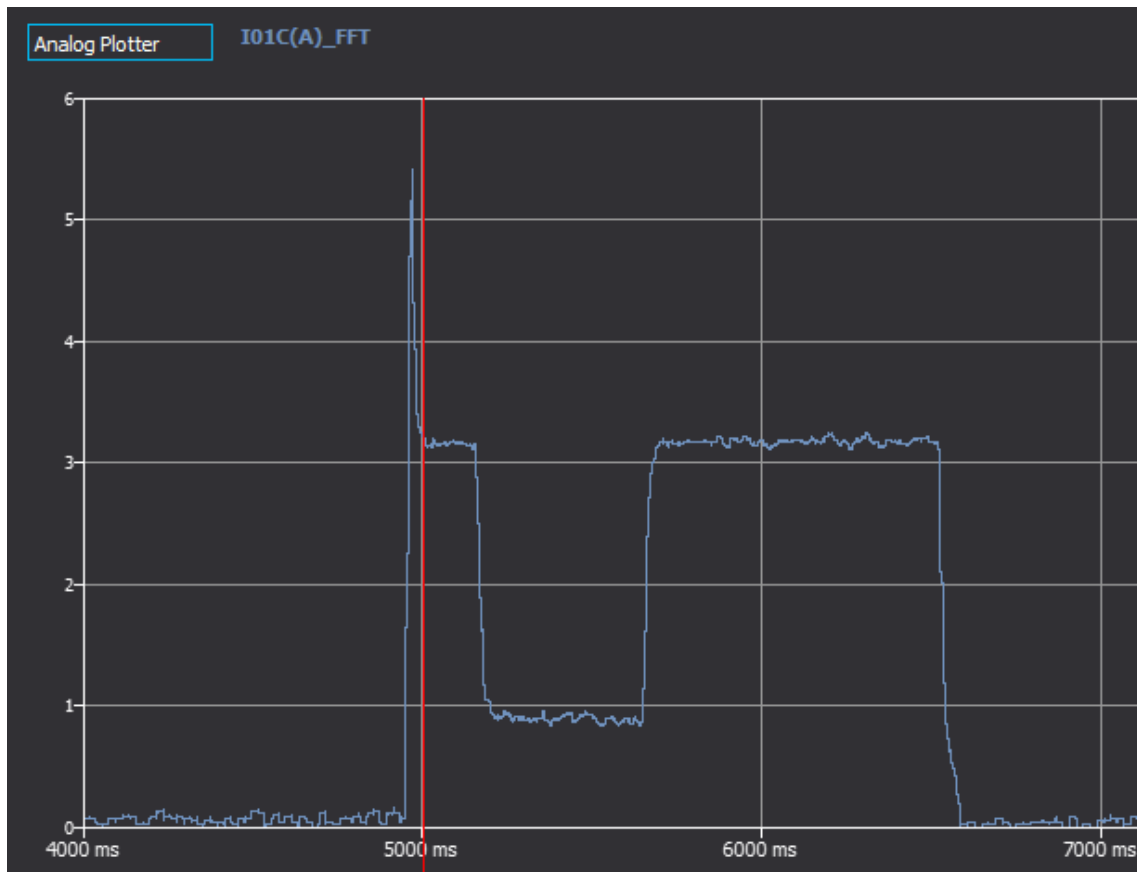
Kaksivaiheiset oikosulkuvirta-arvot haarajohtojen päissä ovat pienimmillään Niemikylän haaran päässä 760 A. Johtolähdön oikosulkusuojauskeskityksen ensimmäinen porraskorjaus on aseteltu toimimaan 150 A oikosulkuvirrasta. Tällöin myöskään haarajohtojen automaattisen erotuksen ei tarvitse toimia alle 150 A virrasta, vaikka haarajohtojen kuormitusvirran puolesta myös pienemmän asetteluarvon käyttäminen olisi mahdollista.

5.4 Maasulkukokeista saatujen häiriötallenteiden tarkastelu

Vuonna 2018 Koillis-Satakunnan Sähkö teetti Inhan sähköasemalla maasulkukokeita maasulkusuojauskeskityksen toimivuuden selvittämiseksi. Kokeet suoritettiin ensikokeina käyttäen Mavikon testauskärryä. Jokaisesta tehdystä maasulkukokeesta otettiin talteen häiriötallenne myöhempiä tarkastelua varten. Häiriötallenteita analysoimalla voidaan arvioida maasulkuvirran sammutuksen toimivuutta ja jäännösmaasulkuvirran suuruutta.

Maasulkuvirran reaktiivisen komponentin määrittäminen onnistuu helposti laskennallisesti, mutta resistiivisen komponentin määrittäminen luotettavasti on erittäin vaikeaa. Yhtenä keinona maasulkuvirran resistiivisen komponentin määrittämiseen on tehdä maasulkukokeet, jossa tukittavaan verkkoon tehdään maasulku. Tällöin vika lähdön suojauskeskityksen häiriötallenteita analysoimalla voidaan selvittää, kuinka suuri on jäännösmaasulkuvirran resistiivinen komponentti. Tallenteen avulla voidaan myös selvittää kuinka suuren resistiivisen virran kompensointikuristimen lisävastus tuottaa maasulun aikana. Tällöin loput resistiivisestä virrasta voidaan olettaa aiheutuvan verkon ja kompensointi kuristimen häviöistä. Kompensointikuristimen tuottamat häviöt voidaan selvittää tekemällä maasulku-

koe verkon ollessa maasta erotettu, eli kompensointikuristin irrotettuna, jolloin maasulkuvirran resistiivinen komponentti koostuu pelkästään verkon häviöistä. Kuvassa 36 on esitetty Myllymäen lähdön nollavirta maasulkuvian aikana.

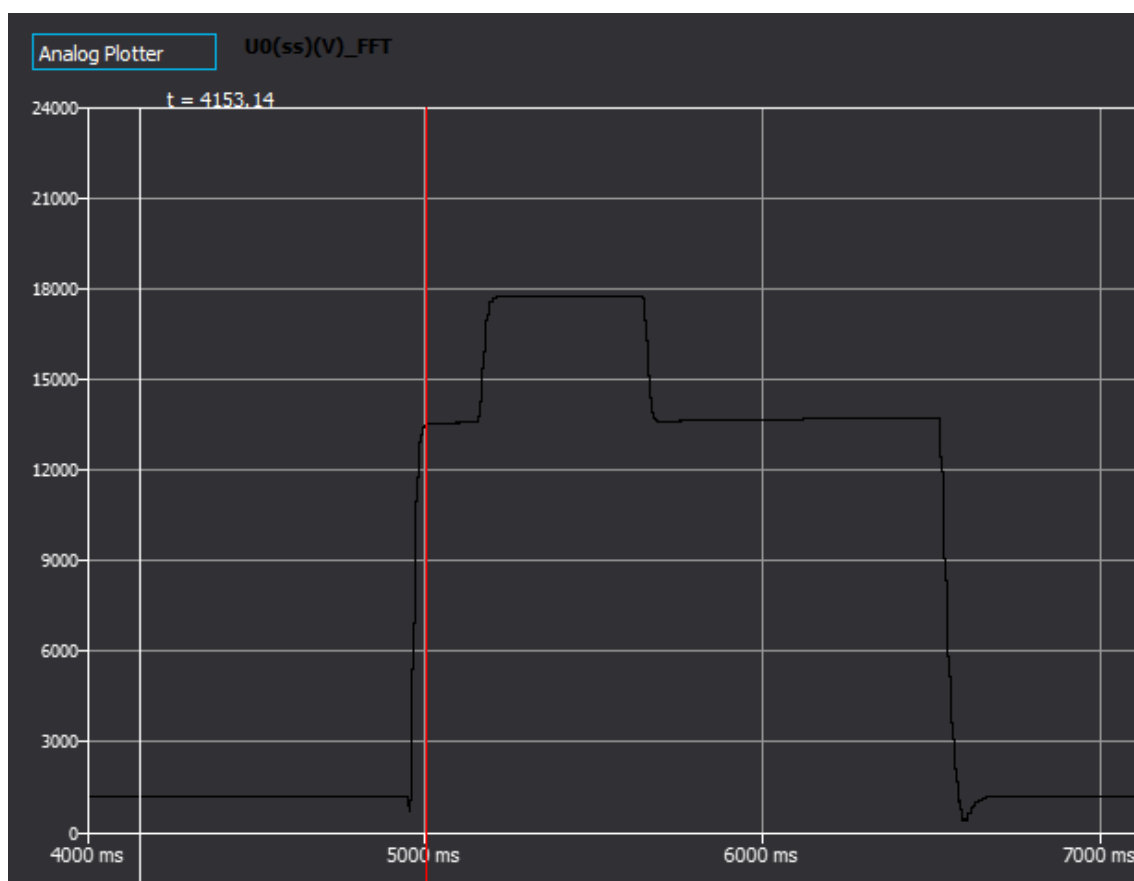


Kuva 36. Myllymäen lähdön nollavirta maasulkukokeen aikana.

Kuvasta nähdään nollavirran pienentyvän 0,8 A suuruiseksi 150 ms vian alkamisen jälkeen, kun sammutuskuristimen lisävastus irrotetaan 500 ms ajaksi. Kuristimen lisävastuksen kytkeydyttyä takaisin kasvaa nollavirta lisävastuksen irrottamista edeltävän tilan suuruiseksi (3,2 A). Kokeessa ei käytetty erillistä vikavastusta, mutta maaperästä ja maadoituselektrodista aiheutui merkittävä maadoitusresistanssi, joka pienensi nollavirtaa ja nollajännitettä. Lisävastuksen irrottua voidaan nollavirran olettaa olevan täysin reaktiivista, jolloin lisävastuksen tuottamaksi resistiiviseksi virraksi voidaan laskea

$$\sqrt{3,2^2 - 0,8^2} = 3,1A, \quad (16)$$

Tämä arvo on hieman pienempi kuin lisävastukselle ilmoitettu 3,7 A. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että lisävastus oli edellisten kokeiden aikana ehtinyt jo lämmetä, jolloin sen resistanssi on suurempi kuin kylmänä. Kuvassa 37 on esitetty nollajännite maasulkukokeen aikana Inhan sähköasemalla.

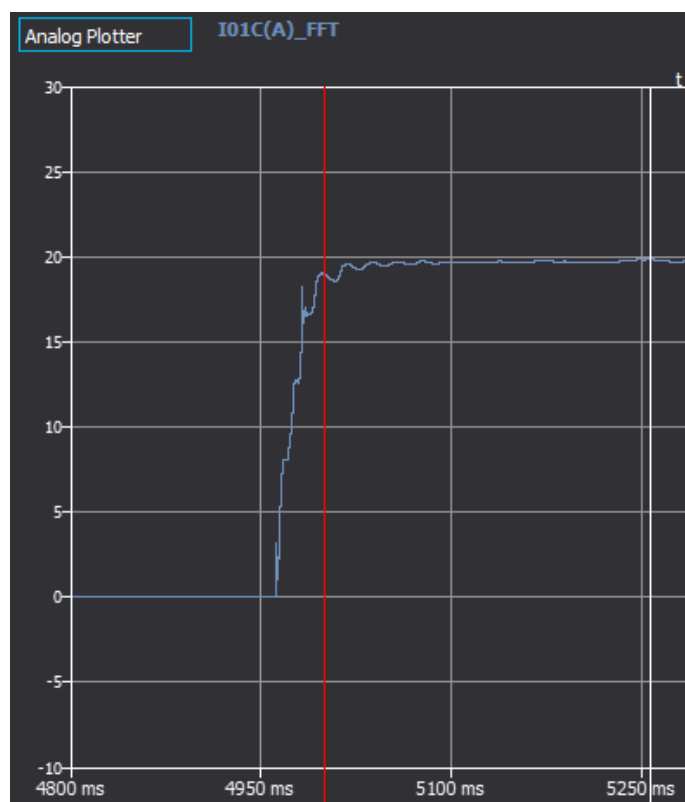


Kuva 37. Inhan sähköaseman nollajännite maasulkukokeen aikana.

Nollajännite nousee suurimmillaan lähes 90 %:iin nimellisjännitteestä. Tästä voidaan päätellä, että tehty maasulku ei ollut täysin vikavastukseton. Vikavastuksen irtoamisen seurauksena nollavirta pienenee niin pieneksi, että se saattaa alittaa nollavirran havahtumisrajan. Tällöin vian kesto pitkittyy tarpeettomasti.

Kun maasulkukoe tehdään maasta erotettuun verkkoon ilman vikavastusta, voidaan saata nollavirtaa verrata verkon laskennallisen maasulkuvirran suuruuteen. Häiriötallenteesta saatuun nollavirtaan täytyy lisätä vikaantuneen lähdön itse tuottama maasulkuvirta, sillä se kulkee kaapelivirta muuntajan läpi kahdesti kumoten näin itsensä. Näin voidaan

arvioida mittamuuntajien toimivuutta, käytössä olevan hajautetun maasulkuvirran toimivuutta, sekä verkostolaskennan paikkaansa pitävyyttä. Inhan sähköaseman verkon tuottama maasulkuvirta on laskennallisesti 27,5 A. Maasulkukoetta tehtäessä käytössä oli 3,5 A:n sammutuskuristin. Vikalähtönä koetta tehtäessä käytettiin Fiskarsin lähtöä, joka on hyvin lyhyt ja jonka tuottama maasulkuvirta on erittäin pieni. Lisäksi tulee huomioida maadoitusresistanssin vaikutus nollavirran suuruuteen, tosin maadoituselektrodina käytettiin sähköaseman maadoitusta, jonka maadoitusresistanssin voidaan olettaa olevan hyvin pieni. Nämä seikat huomioiden tulisi nollavirran olla noin 23 A. Kuvassa 38 on esitetty Fiskarsin lähdön nollavirran suuruus vikaresistanssittomassa maasulussa.



Kuva 38. Fiskarsin lähdön nollavirta vikaresistanssittoman maasulun aikana.

Kuvasta havaitaan, että nollavirta on suuruudeltaan noin 20 A, joka on hieman pienempi kuin laskennallisesti määritetty. Tästä voidaan kuitenkin todeta, että laskennallisesti määritetty maasulkuvirran suuruus on melko lähellä todellista maasulkuvirtaa.

5.5 Suosituksia

Seuraavassa on listattu suosituksia maasulkusuojauksen toimivuuden ja vaatimusten täyttämiseksi nyt ja tulevaisuudessa. Sen lisäksi on esitetty muutamia huomioon otettavia seikkoja käyttötoiminnan ja suunnittelun kannalta kaapelointiasteen noustessa siirryttäessä kohti tavoiteverkkoa.

5.5.1 Maasulkuvirran kompensointikapasiteetin lisäystarpeet

Verkon maasulkuvirtatasojen kasvaessa kaapeloinnin edetessä on kuristinten kapasiteettia suurennettava, jotta haluttu kompensointiaste voidaan ylläpitää. Vaihtoehtona sähköasemalla olevan kuristimen korvaamisella isommalla on toisen kuristimen asentaminen vanhan rinnalle. Tällöin kuristimista pienempi toimii kiinteänä ilman säätäjää, ja vain isompaa kuristinta säädetään. Näin voidaan vanhaa toimivaa kuristinta hyödyntää ja säästää investointikustannuksissa. Toisena vaihtoehtona on yhdellä asemalla pieneksi jääneen kuristimen hyödyntäminen toisella sähköasemalla, jossa vanha kuristin on vielä pienempi tai sitä ei ole ollenkaan.

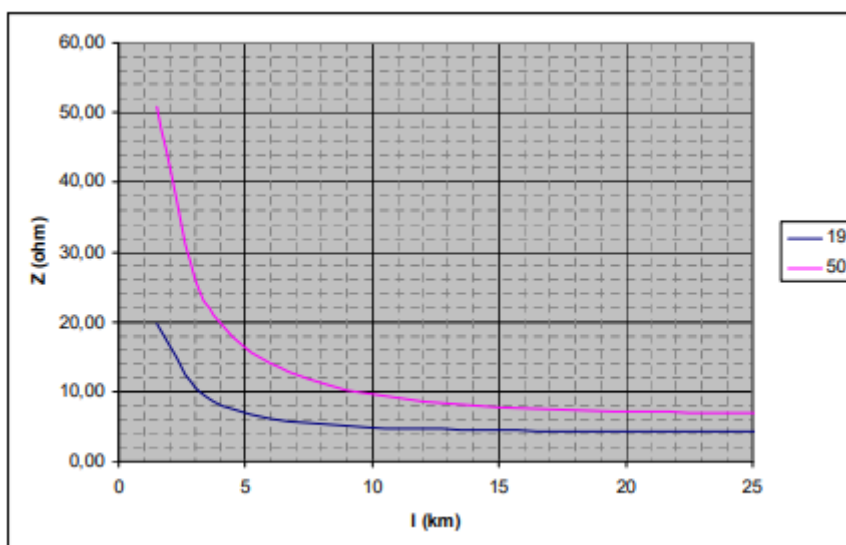
Pelkkää keskitettyä maasulkuvirran kompensointia käytettäessä joudutaan kelojen mitoituksessa huomioimaan myös korvauskykentätilanteet, joissa toisen aseman lähtöjä kytketään saman sammutuksen perään. Tällöin asemien sammutuskeloilla täytyy olla ylimääräistä sammutuskapasiteettia käytettävissä. Tarvetta tälle kelojen ylimitoitukselle voidaan vähentää käyttämällä lähtöjen kompensointiin hajautettuja sammutuskuristimia. Nämä kuristimet kompensoivat osan lähdön tuottamasta maasulkuvirrasta ja vähentävät näin keskitetyn maasulkuvirran kompensoinnin tarvetta, sillä siirrettäessä lähtö toisen aseman perään siirtyy myös hajautettu kuristin mukana. Suurin hyöty hajautetusta kompensoinnista saadaan pitkällä ja paljon maasulkuvirtaa tuottavilla kaapelilähdöillä. Tällöin myös maasulkuvirran resistiivistä komponenttia voidaan tehokkaasti pienentää. Hajautettua kompensointia käytettäessä on kuitenkin muistettava, ettei yksittäistä lähtöä ylikompensoida missään tilanteessa, sillä ylikompensointi saattaa aiheuttaa kyseisen lähdön maasulkusuojien virheellisen toiminnan vian todellisuudessa sijaitessa jollain muulla lähdöllä, mikäli käytössä on I_0 sin suojausfunktio. Hajautettua kuristimen sijoituspaikkaa

mietittäessä on huomioitava myös mahdollisuus, että osa lähdestä on erotettu verkosta. Suojauksen toimivuuden varmistamiseksi myös erikoistilanteissa on hyvä mitoittaa kuristimen kompensoimaan ainoastaan sen erotusvälin tuottama maasulkuvirta, jossa kuristin sijaitsee.

5.5.2 Keinoja kosketusjännitevaatimusten täyttämiseksi sekaverkoissa

Sekaverkoissa kosketusjännitevaatimusten täytyminen muodostuu usein ongelmaksi avojohto-osuuksilla, joissa muuntamoiden yksittäismaadoitukset voivat saada paikallisista maadoitusolosuhteista riippuen huonoja arvoja. Tällöin huolimatta maasulkuvirran kompensoinnista saattaa jäännösmaasulkuvirta olla edelleen niin suuri, ettei kosketusjännitevaatimuksia kyetä täyttämään. Toisaalta myöskään maasulkusuojien aikahidastuksia ei loputtomasti voida lyhentää suurempien kosketusjännitteiden sallimiseksi. Käyttämällä 0,7 s aikahidastusta on valokaarimaasuluilla aikaa sammua, ja samalla voidaan sallia hie-
man suuremmat kosketusjännitteet kuin käytettäessä vanhaa 1,35 s aikahidastusta. Mikäli nämä keinot eivät auta, jää vaihtoehdoksi jää muuntamoiden maadoitusresistanssin pienentäminen parantamalla maadoituksia. Maadoituksia voidaan parantaa lisäämällä maadoituselektrodeja, mutta mikäli paikalliset maadoitusolosuhteet ovat erittäin huonot, ei tämä keino ole välttämättä toimiva.

Toinen vaihtoehto maadoitusresistanssin pienentämiseksi on yhdistää muuntamoiden maadoituksia keskenään. Tällöin muodostuvan maadoitusketjun maadoitusresistanssi muodostuu pienemmäksi kuin yksittäisten muuntamoiden. Kuvassa 39 on esitetty, kuinka yhdistetty maadoitusresistanssi pienenee yhdistettäessä 1,5 km etäisyydellä toisistaan sijaitsevien muuntamoiden maadoituksia 35 mm² kuparijohtimella, jonka ominaisimpedanssi on 0,524 Ω/km. Yhdistettävien muuntamoiden maadoitusresistanssit yksinään ovat 50 Ω tai 19 Ω.



Kuva 39. Muuntamoketjun yhdistetty maadoitusresistanssi ketjun pituuden funktiona, jossa 1,5km välein sijaitsevien jakelumuuntamoiden maadoitukset ovat yhdistetty (Lehtonen, Saarijärvi & Nurminen 2010: 17)

Kuvasta 39 voidaan päätellä, että yhdistämällä kahden maadoitusresistanssiltaan samanlaisen muuntamon maadoitukset muodostuu yhdistetyksi maadoitusresistanssiksi noin puolet yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssista. Erillään olevien maadoitusten yhdistämisellä pystytään maadoitusresistanssia pienentämään tehokkaasti.

Lisäksi yhdeksi ratkaisuksi sekaverkon kosketusjänniteongelmaan KAPELI-projektin loppuraportissa (Lehtonen ym 2010: 18) esitettiin avojohto-osuuksien galvaanista erottamista muusta verkosta. Käytännössä siis kaapeliverkon ja avojohtoverkon rajalle sijoitettaisiin 20 kV/20 kV muuntaja, jolla avojohto-osuudet erotettaisiin kaapeliverkosta. Näin muodostuvan avojohtoverkon maasulkuvirta jäisi hyvin pieneksi. Tällöin kuitenkin suojausten toteuttamiseksi tarvittaisiin avojohto-osuudelle oma nollajännitteen mittaussuojauksen toteuttamiseksi. Kyseinen menetelmä ei kuitenkaan tiettävästi ole otettu käyttöön jakeluverkoissa.

5.5.3 1 kV jännitetason hyödyntäminen maasulkuvirtatasojen kasvun hillitsemiseksi

1 kV verkko muodostaa uuden jännitetason 20 kV ja 400 V välille. Kyseinen jakelujännite on käyttökelpoinen matalasti kuormitettujen keskijännitehaarojen saneerauksessa. 1 kV

verkossa käytettävät 20/1 kV muuntajat muodostavat galvaanisen erotuksen 1 kV ja 20 kV verkon välille. Tällöin 1 kV verkolla ei ole vaikutusta 20 kV maasulkuvirtatasoihin. Käyttämällä 1 kV järjestelmää korvaamaan 20 kV kaapelointia soveltuviissa kohteissa pystytään vähentämään maasulkuvirtojen kasvua kaapeloinnin edetessä. Menetelmällä pystytään myös pienentämään 20 kV kaapelin tuottamaa loistehoa sekä vähentämään muulle verkolle aiheutuneita keskeytyksiä 1 kV verkon muodostaessa oman suojausalueensa.

1 kV järjestelmä voi olla hyvä ratkaisu kosketusjänniteongelmaan haarajohtojen saneeraus-yhteydessä, jos aiempi 20/0,4 kV muuntamo, jonka maadoitusresistanssin arvo on maaperän ominaisuuksien vuoksi ollut vaikeaa saada riittävän pieneksi, korvataan 1/0,4 kV muuntajalla, jolloin kosketusjänniteongelma poistuu. 1 kV verkon maasulkuvirrat ovat niin pieniä, että myös erittäin huonoissa maadoitusolosuhteissa kosketusjännitevaatimukset kyetään helposti täyttämään. Nämä 1 kV järjestelmän käytöllä saavutettavat edut on hyvä ottaa huomioon suunnittelussa. Suurimmat hyödyt 1 kV verkon käytöstä saadaan runsaasti haaroja sisältävissä verkoissa, jolloin vain runko johto toteutetaan keskijännite kaapelilla ja haarajohtojen yhteydessä käytetään 1 kV jännitetasoa. Tällöin keskijännitekaapelin pituutta verkossa voidaan vähentää merkittävästi. Lisäksi 1 kV verkon käyttöä puoltaa Koillis-Satakunnan Sähkön verkon sijainti alueella, jossa väestön kasvu tilastokeskuksen väestöennusteen mukaan tulee olemaan negatiivinen. Taulukossa 16 on esitetty Koillis-Satakunnan Sähkön verkkoalueella sijaitsevien kuntien ennustettu väestönkehitys tulevina vuosikymmeninä.

Taulukko 16. Koillis-Satakunnan verkkoalueella sijaitsevien kuntien ennustettu väestönkehitys tulevina vuosikymmeninä (Tilastokeskus 2004).

| | Vuosi | | |
|---------------|-------|-------|-------|
| | 2020 | 2030 | 2040 |
| Virrat | 6 609 | 6 174 | 5 747 |
| Alavus | 12420 | 12220 | 11825 |
| Ähtäri | 6 383 | 6 207 | 5 901 |
| Kihniö | 1 981 | 1 861 | 1 743 |

Väestöennusteen mukaan väestön määrä verkkoalueella tulee vähenemään tulevaisuudessa, jolloin myöskään väestön kasvun aiheuttamaa sähkön käytön kasvua ei ole odotettavissa. Tällöin 1 kV:n järjestelmä, jonka kuormitettavuus nykyisellään on riittävä, riittää todennäköisesti myös tulevaisuudessa, poikkeuksena alueet, joilla vapaa-ajan asuntojen määrän voidaan olettaa lisääntyvän. 1 kV järjestelmän rakentamisen jatkaminen tulevaisuudessa on näin ollen suotavaa.

5.5.4 Kompensointiasteen muutos

Maasulkuvirran kompensointiasteena Koillis-Satakunnan Sähköllä on käytetty 95 %. Tällöin verkon tuottamasta maasulkuvirrasta 5 % on jätetty kompensoimatta. Tämä säätäjän asettelu oli aikanaan yleisesti käytössä. Lievällä alikompensoinnilla terveen tilan nollajännite ei noussut niin suureksi kuin 100 % kompensointiasteella. Verkon tuottaman maasulkuvirran ollessa kohtuullinen jäi jäännösmaasulkuvirta 95 % kompensointiasteella niin pieneksi, että ohimenevät maasulkuvirrat sammuihin itsestään ja kosketusjännitevaatimukset kyettiin täyttämään. Kaapeloinnin lisääntymisen myötä verkon tuottamat maasulkuvirrat kasvavat, jolloin myös jäännösmaasulkuvirta kasvaa samassa suhteessa, mikäli käytetään suhteellista sivuun viritystä. Käytettäessä absoluuttista sivuun viritystä pysyy jäännösmaasulkuvirran kapasitiivinen osuus määritellyn suuruusena riippumatta verkon tuottaman maasulkuvirran suuruudesta.

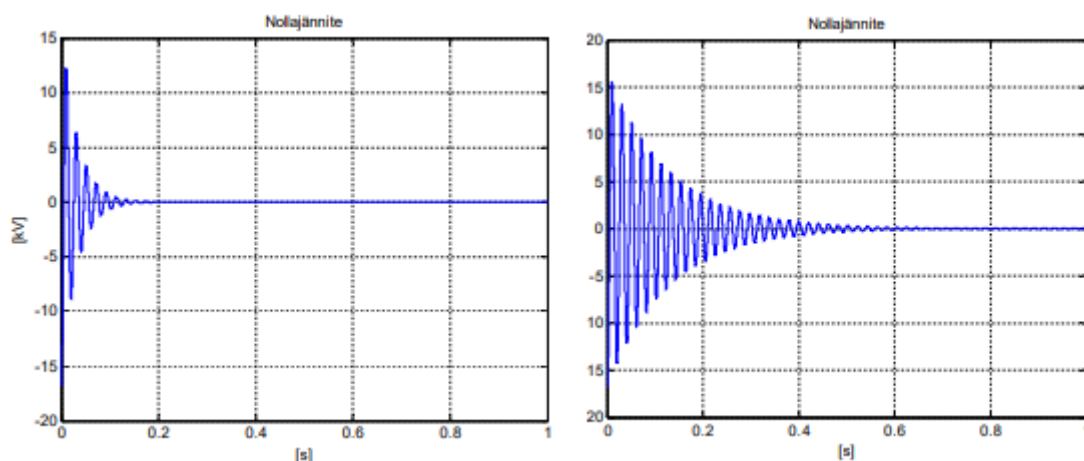
Mavikon suositus on, että verkkoa käytettäisiin 2 A alikompensoituna. Koillis-Satakunnan Sähkön verkoissa tämä tarkoittaisi kompensointiasteen nousua ja siirtymistä lähemmäs resonanssipistettä. Tällöin terveen tilan nollajännite tulee kasvamaan verrattuna matalampaan kompensointiasteeseen. Toisaalta jatkuva kaapelointiasteen kasvu tekee verkosta entistä symmetrisemmän, mikä taas laskee terveen tilan nollajännitettä. (Autio 2019)

Pienemmällä jäännösmaasulkuvirran arvolla on myös positiivinen vaikutus ohimenevien maasulkuvikojen itsestään sammumiselle. Myös kosketusjännitevaatimusten täyttymisen selvittäminen tulevaisuudessa helpottuu, kun laskelmia ei tarvitse päivittää verkon maa-

sulkuvirta tasojen muuttuessa. Lisäksi asemien väliset erot jäännösmaasulkuvirran suuruuksissa koostuvat absoluuttista sivuun viritystä käytettäessä ainoastaan resistiivisestä komponentista, mikäli kompensointikuristinten kapasiteetti on riittävä. Tällöin kosketusjännitevaatimusten täyttäminen korvauskytkentätilanteissa helpottuu merkittävästi.

5.5.5 Kompensointikuristimen lisävastuksen ohjaustapa

Sammutetun verkon maasulkusuojauksen toiminnan perustuessa maasulkuvirran resistiivisen komponentin mittaamiseen suojauksen toimivuuden varmistamiseksi käytetään kompensointikuristimen rinnalla vastusta, jonka tehtävä on kasvattaa maasulkuvirran resistiivistä komponenttia. Vastusta pidetään yleensä päällä myös terveessä tilassa terveen tilan nollajännitteen madaltamiseksi ja siinä esiintyvien häiriöiden vähentämiseksi. Lisävastus myös nopeuttaa vian jälkeisten värähtelyilmiöiden vaimenemista ja näin vähentää vian jälkeisten terveiden lähtöjen sympatialaukaisujen mahdollisuuksia. Kuvassa 40 on esitetty lisävastuksen vaikutus vian poistumisen jälkeen esiintyvän jälkivärähtelyilmiön vaimenemiseen.



Kuva 40. Nollajännitteen vaimeneminen vian poistuttua. Vasemmassa kuvassa lisävastus on kytkettynä ja oikean puoleisessa ei. (muokattu Nikander, 2017)

Kaapeloitaessa keskijänniteverkkoa kasvaa verkon kapasitiivinen maasulkuvirta, mutta verkon vaimennus ei kuitenkaan kasva samassa suhteessa. Tällöin kaapelointiasteen kasvaessa jälkivärähtelyilmiön kesto pitkittyy (Nikander 2017 23).

Koillis-Satakunnan Sähköllä kuristimen lisävastusta pidetään terveessä tilassa päällä, ja maasulun aikana vastus irrotetaan 0,5 s ajaksi, jonka jälkeen vastus kytkeytyy jälleen takaisin. Vastuksen irrottamisella maasulun aikana on pyritty parantamaan valokaarimaasulkujen itsestään sammumisen todennäköisyyttä. Virtarajana maasulun itsestään sammumiselle sammutetuissa verkoissa pidetään 60 A. Jäännösmaasulkuvirrat ovat kuitenkin huomattavasti pienempiä, jolloin lisävastuksen pitäminen kytkettynä myös vian aikana ei estä maasulkuvirran itsestään sammumista. Lisävastuksen irrottaminen maasulun aikana saattaa aiheuttaa maasulkusuojan havahtumistilan päättymisen lisävastuksen ollessa irrotettuna. Tällöin maasulkuvian vaikutusaika pitenee, mikä tulisi huomioida kosketusjännitteitä laskettaessa.

5.5.6 Sähköasemat ilman katkeilevan maasulun tunnistavia suojaraleitä

Uudet suojaraleet pystyvät havaitsemaan katkeilevan maasulun luotettavasti, jolloin suojauksen selektiivisyys toteutuu. Vanhemman sukupolven suojaraleet eivät havaitse katkeilevan maasulun aikana esiintyvää nollavirtaa, koska virtapiikit ovat hyvin lyhyitä. Katkeilevan maasulun läpilyöntien välisenä aikana nollajännite palautuu kohti terveen tilan arvoa, mutta mikäli läpilyöntejä tapahtuu riittävän usein, saattaa nollajännite pysyä jatkuvasti koholla, mikä saattaa aiheuttaa maasulun varasuojauksena käytettävän kiskosuojan aiheettoman toiminnan. Tällöin sähkön syöttö katkeaa jokaiselta aseman lähdöltä, vaikka katkeileva vika esiintyy ainoastaan yhdellä lähdöistä. Koska vanhat maasulkusuojat eivät kykene hyödyntämään katkeilevan maasulun aikana esiintyviä erittäin lyhyitä nollavirran piikkejä, ei vikaantunutta lähtöä pystytä tunnistamaan.

Nollajännitteen pysyminen koholla kertoo, että verkossa on maasulku. Tätä tietoa hyväksi käyttäen voidaan ennalta määritetyssä järjestyksessä alkaa erottaa lähtöjä verkosta. Lähtöjä erotetaan yksi kerrallaan verkosta, kunnes vikaantuneen lähdön irrottua nollajännite palautuu normaaliksi. Viimeiseksi erotettu lähtö on tällöin vikaantunut lähtö, ja aiemmin erotettuihin lähtöihin voidaan palauttaa sähkö.

Lähtöjen maasulkusuojiin asetellaan aikahidastukseltaan normaalia suunnattua maasulkusuojaus porrasta huomattavasti hitaampi nollajännitteen nousuun perustuva porras.

Lähtöjen välinen aikahidastus voidaan toteuttaa niin, että vähempiarvoiset ja suurimman vikaantumisherkkyyden omaavat lähdöt erotetaan ensimmäisenä ja tärkeimmät lähdöt erotettaisiin viimeisenä. Mikäli nollajännite on kaikkien lähtöjen irrottua edelleen koholla, vasta sen jälkeen syötön katkaisija avataan. Lähtöjen välisen aikahidastuksen on oltava riittävä, jotta nollajännitteellä on riittävästi aikaa vaimentua, ennen kuin seuraava lähtö erotetaan.

Vastaava järjestely voidaan toteuttaa myös muuttamalla maasulun varasuojaus hälyttäväksi, jolloin vikaantuneen lähdön tunnistaminen ja erottaminen verkosta jää valvomohenkilöstön tehtäväksi. Tällöin vika ehtii kuitenkin olla päällä pidempään, mutta turhilta keskeytyksiltä voidaan välttyä, mikäli vika kyetään paikallistamaan jakorajoja muutelemalla ja tarkkailemalla samalla nollajännitteessä tapahtuvia muutoksia. Hälyttävän maasulkusuojauksen käyttö on mahdollista, kunhan varmistutaan, että SFS6001 mukaiset kosketusjännitevaatimukset täyttyvät. Katkeilevan maasulun aikana esiintyvät vaarajännitteet ovat hyvin lyhytkestoisia, jolloin kosketusjännite vaatimukset täyttyvät ainakin sammutetuissa verkoissa. Mikäli katkeileva maasulku muuttuu pysyväksi, havaitsevat suunnatut maasulkusuojat vian ja erottavat vikaantuneen lähdön verkosta automaattisesti.

5.5.7 Virtainjektiolaitteiden tarpeellisuus tavoiteverkossa

Kun verkon kaapelointiaste kasvaa, verkko muuttuu entistä symmetrisemmäksi ja tällöin myös kuristimen säätäjän toiminnassaan käyttämä nollajännitteen resonanssikäyrä muuttuu entistä laakeammaksi. Tällöin verkon kytkentätilanteen muuttuessa tapahtuva muutos nollajännitteessä saattaa jäädä niin pieneksi, etteivät perinteiset säätäjät välttämättä havaitse tätä muutosta ja tarvittava kelan säätö saattaa jäädä tekemättä. Verkko saattaa tällöin jäädä tilaan, jossa kompensointiaste ei ole halutun suuruinen.

Nämä ongelmat voidaan välttää ottamalla käyttöön virtainjektiolaitteisto, joka syöttää 50 Hz taajuudesta eroavan virtapulssin verkkoon ja laskee nollajännitteessä tapahtuneen muutoksen avulla verkon resonanssipisteen. Tällöin resonanssipisteen määrittämiseen ei tarvita ollenkaan kelan säätämistä, mikä vähentää kelan säätämisessä käytettävän moot-

torin ja muiden osien kulumista. Virtainjektiolaitteistolla verkon resonanssipiste määritetään yleensä 2 h välein, jolloin verkko ei voi jäädä epävireeseen. Resonanssipisteen määrittäminen tapahtuu nopeasti, ja tämän jälkeen kela voidaan ajaa suoraan oikeaan asentoon. Virtainjektiolaitteiston käyttöönotto on suositeltavaa säätäjän toimivuuden ja kelan säätämisessä käytettävien komponenttien kulumisen vähentämiseksi kaapelointiasteen kasvaessa. (Autio 2019).

5.5.8 Pikajälleenkytkentöjen jännitteetön aika ja hajautettu tuotanto

Jälleenkytkennän tapahduttua saattaa hajautettu tuotanto jäädä pitämään yllä vikapaikan jännitettä, kunnes LoM-suojaus irrottaa hajautetun tuotannon verkosta. Tällöin todellinen jännitteetön aika lyhenee heikentäen jälleenkytkennän onnistumista. Tällä on merkitystä ainoastaan pikajälleenkytkennöissä, joissa jännitteetön aika on muutamia satoja millisekunteja. Aikajälleenkytkennöissä jännitteetön aika on niin pitkä, ettei hajautetun tuotannon vaikutuksella jännitteettömän ajan pienemiseen ole merkitystä. Pikajälleenkytkentöjen toimivuuden varmistamiseksi voi hajautetun tuotannon lisääntyessä olla tarpeen pidentää jännitteetöntä LoM-suojauksen toiminta-aikaa vastaavalla ajalla.

6 YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSTARPEET

Diplomityön tavoitteena oli selvittää, mitä vaikutuksia verkostostrategian mukaisella kaapelointiasteella on maasulkusuojaukseen ja maasulkuvirran kompensointiin. Tarpeen selvitykselle luo sähkömarkkinalain mukaisen toimitusvarmuuden saavuttamiseksi tehtävä mittava maakaapelointi. Kaapeliverkko eroaa sähköisiltä ominaisuuksiltaan suuresti perinteisestä avojohdosta. Merkittävämpänä erona on maakaapelin huomattavasti suurempi maakapasitanssi. Työ keskittyikin siihen, mitä tulisi ottaa huomioon, kun ennen suurelta osin avojohdoin toteutettua keskijänniteverkkoa aletaan enenevässä määrin kaapeloida. Lisäksi yhtenä tärkeimmistä asioista työssä oli selvittää standardin SFS6001 mukaisesti, täytyvätkö kosketusjännitevaatimukset nyt ja tulevaisuudessa tavoiteverkossa, sekä antaa ohjeistus, jolla vaatimukset saadaan täyttymään.

Työn tulokset kertovat, että kaapelointiasteen kasvulla on merkittäviä vaikutuksia maasulkusuojaukseen ja maasulkuvirran kompensointitarpeisiin. Kaapelointiasteen kasvu tulee aiheuttamaan investointitarpeita verkonrakentamisen lisäksi myös sähköasemilla, kun maasulkuvirran ja loistehon kompensointitarpeet kasvavat, kompensointikuristimen säätäjät tarvitsevat toimiakseen virtainjektiolaitteet, ja suojareleiden tulee kyetä tunnistamaan katkeileva maasulku. Verkon muutokset ja kasvavat maasulkuvirrat on otettava huomioon verkoston suunnittelussa ja käytössä. Verkkoa suunniteltaessa tulee huomioida kasvavat maasulkuvirrat siten, että tavoiteverkon mukaiset maasulkuvirtatasot otetaan huomioon maasulkuvirran kompensointi-investointeja tehtäessä. Myös kosketusjännitevaatimusten täyttymisen varmistamiseksi täytyy muuntamoiden maadoitukset mitoittaa jo rakennusvaiheessa siten, että kosketusjännitevaatimukset täyttyvät. Pitkillä kaapeloiduilla lähdöillä olisi suunnitteluvaiheessa hyvä huomioida mahdolliset hajautetun kompensoinnin tarpeet maasulkuvirran resistiivisen komponentin kasvun hillitsemiseksi.

Sähköasemien suojareleitä uusittaessa on tarpeen valita suojat, joissa on katkeilevan maasulun tunnistus. Mikäli suojarele ei havaitse katkeilevaa maasulkuvikaa, voi sähköaseman suojaus toimia virheellisesti aiheuttaen sähkönjakelun keskeytyksen koko sähköaseman syöttämälle alueelle. Tämä lisää myös keskeytyskustannuksia sähköyhtiölle. Uusittavien releiden tulee olla toiminnoiltaan sellaisia, että ne kykenevät tunnistamaan sähköverkon

tyypilliset vikatapaukset myös maakaapeliverkosta. Vanhojen releiden ollessa käytössä on syytä maasulun varasuojaus muuttaa hälyttäväksi tai muodostaa lähdöille pelkkään nollajännitteen nousuun perustuva hidas suojausporras, jossa lähtöjen aikahidastukset ovat porrastettu keskenään. Tällöin katkeilevan maasulun aiheuttama koko aseman pimentävä syötön katkaisijan avaaminen voidaan estää.

Työn aikana on noussut esiin jatkotutkimusaihe: kaapeloinnin vaikutus loistehotaseeseen. Kaapelin tiedetään tuottavan runsaasti kapasitiivista loistehoa. Fingridin loissähköhinnoittelu kannustaa verkkoyhtiöitä kompensoimaan loistehon kantaverkon liityntäpiste-kohtaisesti. Tällöin tulisi selvittää, mikä on loistehon kompensoinnin tarve tavoiteverkossa sekä miten loistehon kompensointi kannattaisi toteuttaa teknisesti ja taloudellisesti optimaalisella tavalla. Lisäksi tulisi selvittää loistehon ja maasulkuvirran kompensoinnin yhdistelmälaitteiden käyttöä sekä muita kustannustehokkaita keinoja sähköön toimitusvarmuuden parantamiseksi.

LÄHDELUETTELO

ABB (2000). *Teknisiä Tietoja ja Taulukoita*. 10. painos. Vaasa: Ykkös-Offset Oy. ISBN 951-99366-0-2.

Altonen, J. O, Mäkinen. . K, Kauhaniemi & K. Persson. (2003). Intermittent earth faults—need to improve existing feeder earth fault protection schemes. 17th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2003), Barcelona

Arcteq Relays Ltd (2017). AQ F215 – Feeder Protection IED Instruction Manual. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.2.2019]. Saatavissa: <https://arcteq.fi/wp-content/uploads/2018/01/AQ-F215-Manual-1.10EN-1.pdf>

Autio, K (2019). Toimitusjohtaja, Maviko Oy. Haastattelu, Vaasa 7.3.2019.

Blackburn, L & T.Domin (2007). Protective relaying. Third edition. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-57444-716-3

CENELEC-standardi EN 50438. Requirements for the connection of microgenerators in parallel with public low-voltage distribution networks. 2007. 53 s

Elovaara, J & L, Haarla (2011a). *Sähköverkot I*. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto. ISBN 978-951-672-360-3.

Elovaara, J & L, Haarla (2011b). *Sähköverkot II*. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto. ISBN 978-951-672-363-4.

Elovaara, J & Y, Laiho (1999). *Sähkölaitostekniikan Perusteet*. 4. Painos Helsinki: Valopaino Oy ISBN 951-672-285-7.

- Energiatallisuus (2018). Keskeytystilasto 2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.5.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/2785/Sahkon_keskeytystilasto_2017.pdf
- Fredriksen, A. (2016). Earth fault protection in isolated and compensated power distribution systems. Norwegian University of science and technology. Department of Electric Power Engineering. Master's thesis.
- Guldbrand, A & O, Samuelsson (2008) Influence of Distributed Compensation on Earth Fault Protection in Cable Distribution Systems. 2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008), Glasgow, pp. 615-620.
- Guldbrand, A & O, Samuelsson (2007). Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems. 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, 2007, pp. 1129-1134. doi: 10.1109/PCT.2007.4538474
- Jaakkola, J & K, Kauhaniemi (2013) Factors affecting the earth fault current in large-scale rural medium voltage cable network. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, pp. 1-4.
- Kapassa, E. M. Touloupou, P. Stavrianos & D. Kyriazis. (2018). Dynamic 5G Slices for IoT Applications with Diverse Requirements. Fifth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security, Valencia, 2018.
- KSAT (2019). Vuosikertomus 2018 [online]. [6.5.2019] Saatavissa: <https://ksat.fi/wp-content/uploads/2019/04/ksat-vuosikertomus-2018.pdf> Lakervi, E & J, Partanen (2008). Sähkönjakeluteknikka. Toinen uudistettu painos. Helsinki: Otatieto. ISBN 978-951-672-359-7.

Kuisti, H. J, Altonen. H, Svensson & M, Isaksson (1999) Intermittent earth faults challenge conventional protection schemes. 15th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 1999), Nice

Kumpulainen, L & I, Ristolainen. (2006). Sähköjakeluverkon ja siihen liitetyn hajaautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen. [VTT projektiraportti]

Lehto, Ina. (2009). Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähköjakeluverkkoon. Espoo: Teknillinen korkeakoulu [16.5.2019]. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100081.pdf>

Lehtonen, M. E, Saarijärvi & K, Nurminen (2010) Kevyt kaapelijärjestelmä haja-asutusalueiden tarpeisiin, KAPELI-projektin loppuraportti, Espoo. Julk 30.7.2010

Leikemoser, A & F, Ortolani. (2007) New techniques for compensated networks: tuning the petersen coil, determining the network parameters and performing earth fault current prediction and reconstruction, 19th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2007), Vienna.

Mäki, K. (2007). Novel Methods for Assessing the Protection Impacts of Distributed Generation in Distribution Network Planning. Tampere University of Technology.

Mörsky, J (1992). Relesuojaustekniikka. Toinen korjattu painos. Hämeenlinna: Karisto Oy. ISBN 951-672-175-3.

Orságová, J. D, Topolánek & P, Toman (2012). Earth fault analysis using measured data from fault experiments in actual distribution network. 2012 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012), Birmingham, UK, pp. 1-5.

Repo, S. H, Laaksonen. K, Mäki. A, Mäkinen & P, Järventausta (2005). Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset keskijänniteverkossa. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. 170 s. ISBN 952-15-1382-9.

Suomen virallinen tilasto (SVT) (2004). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.5.2019]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/vaenn/2004/vaenn_2004_2004-09-20_tau_002.html

Tzelepis, D. A, Dysko & C, Booth. (2016). Performance of loss-of-mains detection in multi-generator power islands. 3th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), Edinburgh

Zubić, S. A, Wahlroos. J, Altonen. P, Balcerek & P, Dawidowski. (2016) Managing post-fault oscillation phenomenon in compensated MV-networks, 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), Edinburgh.